

TESIS - 142599

# **IMPLEMENTASI CHANNEL CODING UNTUK MITIGASI EFEK DOPPLER PADA OFDM DENGAN MODULASI ADAPTIF UNTUK VANET**

RIZKHA AJENG ROCHMATIKA  
07111650030009

DOSEN PEMBIMBING  
Dr. Ir. Titiek Suryani, MT  
Dr. Ir. Wirawan, DEA

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TELEKOMUNIKASI MULTIMEDIA  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018





TESIS - 142599

# **IMPLEMENTASI CHANNEL CODING UNTUK MITIGASI EFEK DOPPLER PADA OFDM DENGAN MODULASI ADAPTIF UNTUK VANET**

RIZKHA AJENG ROCHMATIKA  
07111650030009

DOSEN PEMBIMBING  
Dr. Ir. Titiek Suryani, MT  
Dr. Ir. Wirawan, DEA

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TELEKOMUNIKASI MULTIMEDIA  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018



## LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Rizkha Ajeng Rochmatika  
NRP. 07111650030009

Tanggal Ujian : 06 Juli 2018  
Periode Wisuda : September 2018

Disetujui oleh:

1. Dr. Ir. Titiek Suryani, MT  
NIP: 196411301989032001

(Pembimbing I)

2. Dr. Ir. Wirawan, DEA  
NIP: 196311091989031011

(Pembimbing II)

3. Prof. Ir. Gamantyo Hendranto, M.Eng, Ph.D  
NIP: 197011111993031002

(Penguji)

4. Dr. Ir. Puji Handayani, MT  
NIP: 196605101992032002

(Penguji)

5. Dr. Ir. Suwadi, MT  
NIP: 196808181993031002

(Penguji)

Dekan Fakultas Teknologi Elektro

Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T.  
NIP: 197002121995121001

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul **“Implementasi Channel Coding untuk Mitigasi Efek Doppler pada OFDM dengan Modulasi Adaptif untuk VANET”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2018

Rizkha Ajeng R  
NRP. 07111650030009

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# IMPLEMENTASI CHANNEL CODING UNTUK MITIGASI EFEK DOPPLER PADA OFDM DENGAN MODULASI ADAPTIF UNTUK VANET

Nama mahasiswa : Rizkha Ajeng Rochmatika  
NRP : 07111650030009  
Pembimbing : 1. Dr. Ir. Titiek Suryani, MT  
2. Dr. Ir. Wirawan, DEA

## ABSTRAK

Effek Doppler dapat menyebabkan time dan frekuensi selektif fading pada lingkungan VANET. Hal itu terjadi karena kondisi pergerakan kanal yang mudah berubah menyebabkan *time-varying channel*. Sehingga efeknya yaitu Doppler spread menjadi lebih besar daripada periode simbol. Hal itu tentu dapat merusak ortogonalitas antar subcarrier pada sistem OFDM sehingga menimbulkan ICI (*Inter-Carrier-Interference*) dan mengakibatkan kinerja sistem OFDM mengalami penurunan, seperti *bit error rate (BER)*. Pada penelitian ini mengusulkan skema modulasi adaptif dengan *channel coding* untuk mempertahankan nilai BER yang diinginkan serta mendapatkan peningkatan kapasitas dalam sistem. Sekma modulasi adaptif yang diusulkan ini berbeda dengan skema modulasi adaptif pada umumnya yang mengirimkan data secara serial adaptif. Pada penelitian ini, modulasi adaptif yang digunakan berdasarkan perubahan gain kanal sesaat yang terkena fading pada setiap subcarriernya. Simulasi yang dilakukan yaitu dengan menguji modulasi adaptif pada tiga *threshold* dengan variasi frekuensi Doppler serta *channel coding* yang digunakan adalah kode Hamming(7,4). Level *threshold* yang digunakan adalah 0.2 dan 0.4, 0.3 dan 0.5, serta 0.5 dan 0.7. Hasil simulasi menunjukkan bahwa modulasi adaptif dengan *channel coding* memiliki nilai SNR terendah dibandingkan dengan modulasi non-adaptif (BPSK, QPSK, dan 16-QAM) yaitu membutuhkan SNR sebesar 16 dB untuk mencapai  $BER\ 10^{-3}$ . Sementara hasil uji *threshold* pada modulasi adaptif menunjukkan bahwa penetapan *threshold* 0.2 dan 0.4 menghasilkan kinerja BER yang optimal karena memiliki nilai SNR terendah dibandingkan dengan dua *threshold* yang lainnya dan mengalami peningkatan kapasitas terbesar yaitu 127% dibandingkan dengan modulasi non-adaptif (BPSK) pada frekuensi Doppler normalisasi,  $f_d = 0.000128$ .

Key words: OFDM; adaptive modulation; frequency selective; *channel coding*; kapasitas kanal; VANET

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **IMPLEMENTATION CHANNEL CODING FOR DOPPLER EFFECT MITIGATION ON OFDM WITH ADAPTIVE MODULATION IN VANET**

By : Rizkha Ajeng Rochmatika  
Student Identity Number : 07111650030009  
Supervisor(s) : 1. Dr. Ir. Titiek Suryani, MT  
2. Dr. Ir. Wirawan, DEA

## **ABSTRACT**

*The Doppler effect can cause both time and frequency selective fading in VANET because of the node mobility and time-varying channel. The significant effect is that the Doppler spread become much longer than the symbol period. Consequently, the orthogonality among subcarriers on OFDM system will no longer hold and resulting inter-carrier interference (ICI) that will decrease system performance, e.g. bit error rate (BER). In this paper, we propose adaptive modulation schemes to maintain BER with three thresholds tested. Unlike the typical scheme that transmits data with serial adaptive modulation, the proposed scheme transmits its data based on the change in the gain channel that is instantaneously attenuated on each subcarrier. The simulation is done by testing adaptive modulation on three threshold with variation of Doppler frequency and channel coding used is Hamming Code (7,4). Level threshold used are 0.2 and 0.4, 0.3 and 0.5, 0.5 and 0.7. The simulation show adaptive modulation with chaannel coding have the lowest SNR value than non-adaptive modulation. It needs 16 dB to achieve desired BER  $10^{-3}$ . While threshold test results show the 0.2 and 0.4 threshold get optimal BER performance becuase it requires the lowest SNR compared with the other thresholds. In addition, we also observed the increase in system capacity comparison with Doppler variation. Adaptive modulation with threshold 0.2 and 0.4 tested get the largest increase in system capacity that is 127% compared to non-adaptive modulation (BPSK) by applying the lowest frequency Doppler normalized with  $f_d = 0.000128$ .*

*Key words: OFDM; adaptive modulation; frequency selective; channel coding; channel capacity; VANET*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Dengan mengucap puji syukur ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan buku tesis yang berjudul :

**“IMPLEMENTASI CHANNEL CODING UNTUK MITIGASI  
EFEK DOPPLER PADA OFDM DENGAN MODULASI ADAPTIF UNTUK  
VANET”**

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat akademik Program Magister Jurusan Teknik Elektro , Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Banyak pihak telah memberikan bantuan selama penulis menempuh pendidikan di Jurusan Teknik Elektro ITS ini, karena itu penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada :

1. Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang telah memberikan beasiswa *fresh graduate* selama dua tahun kepada penulis sehingga penulis dapat menjadi bagian dari mahasiswi pasca sarjana ITS pada tahun 2016.
2. Ibu Dr. Titiek Suyani, MT, dan Bapak Dr. Ir. Wirawan, DEA. yang memberikan motivasi, bimbingan, dan arahan hingga penulis mampu menyelesaikan penelitian ini.
3. Kedua orang tua serta kakak tercinta, Anies Puspa Nirvana, atas doa, semangat, serta dukungan yang selalu mengiringi setiap langkah penulis dalam kondisi apapun dan memotivasi penulis untuk bisa berusaha menjadi yang terbaik.
4. Bapak / Ibu dosen pengajar di Program studi Telekomunikasi Multimedia.
5. Tim VANET (Pak Wahyu Pamungkas, Mbak Aisyah Novfitri, dan Mas Ardi) atas bantuan, kerjasama dan rekan diskusi dalam pengerjaan penelitian.
6. Teman seperjuangan TMM 2016, anggota Lab A.205 dan B.304, serta keluarga Telkom yang memotivasi dan saling membantu untuk dapat mengerjakan penelitian hingga selesai.
7. Sahabat “*State Officials*” dan angkatan E52 ITS atas canda tawa dan kebersamaan yang selalu tercipta.
8. Semua pihak yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan buku ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penyusunan buku tesis ini, sehingga segala kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan untuk menyempurnakan tesis ini. Selain itu, penulis berharap ada kelanjutan penelitian lain sehingga tesis ini dapat bermanfaat. Surabaya, Mei 2018

Penulis,

Rizkha Ajeng Rochmatika

NRP. 07111650030009

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....	v
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	ix
DAFTAR ISI .....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xvii
DAFTAR TABEL .....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	4
1.5 Kontribusi .....	4
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA .....	7
2.1 Pendahuluan .....	7
2.2 Kajian Penelitian Terkait .....	7
2.3 VANET .....	9
2.4 OFDM .....	11
2.5 Model Kanal .....	14
2.6 Doppler Shift .....	15
2.7 Modulasi .....	16
2.7.1 BPSK .....	16
2.7.2 QPSK ( <i>Quadrature Phase Shift Keying</i> ) .....	17
2.7.3 16-QAM ( <i>16-Quadrature Amplitude Modulation</i> ) .....	18
2.8 <i>Channel Coding</i> .....	19
2.8.1 Kode Hamming .....	20
2.8.2 <i>Encoding Hamming</i> .....	21
2.8.3 <i>Decoding Hamming</i> .....	23
2.8.4 <i>Error Detection</i> .....	23

2.9	<i>Bit Error Probability</i> ( $P_b$ ).....	25
2.9.1	Kanal AWGN .....	26
2.9.2	Kanal Rayleigh Fading .....	27
2.10	Kapasitas Kanal.....	30
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....		33
3.1	Pendahuluan .....	33
3.2	Diagram <i>Fishbone</i> Penelitian .....	34
3.3	Diagram Blok Penelitian .....	35
3.4	Parameter Simulasi Sistem Modulasi Adaptif pada OFDM .....	37
3.5	Algoritma Modulasi Adaptif .....	37
3.6	Penentuan <i>Threshold</i> .....	40
3.7	Implementasi <i>Channel Coding</i> pada Modulasi Adaptif .....	42
3.8	Probability Density Function AWGN .....	45
3.9	Probability Density Function Kanal Rayleigh Fading .....	46
3.10	Verifikasi Simulasi Sistem Model Kanal AWGN.....	47
3.10.1	BPSK Kanal AWGN .....	47
3.10.2	QPSK Kanal AWGN .....	49
3.10.3	16-QAM Kanal AWGN .....	51
3.11	Verifikasi Simulasi Sistem Model Kanal Rayleigh.....	53
3.11.1	BPSK Kanal Rayleigh .....	53
3.11.2	QPSK Kanal Rayleigh .....	53
3.11.3	16-QAM Kanal Rayleigh .....	55
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....		57
4.1	Pendahuluan .....	57
4.2	Uji Kinerja Sistem pada Kanal AWGN .....	57
4.2.1	Hasil Simulasi Modulasi Non-Adaptif pada Kanal AWGN.....	57
4.2.2	Hasil Simulasi Modulasi Adaptif dengan Variasi <i>Threshold</i> pada Kanal AWGN.....	59
4.2.3	Hasil Konstelasi Simbol pada Kanal AWGN.....	61
4.3	Uji Kinerja Sistem pada Kanal Frekuensi Selektif Fading.....	62
4.3.1	Hasil Simulasi Modulasi Adaptif dan Non-Adaptif pada Kanal Frekuensi Selektif Fading.....	63
4.3.2	Hasil Simulasi Modulasi Adaptif dengan Variasi <i>Threshold</i> .....	64



4.4	Grafik CCDF dengan Variasi Doppler .....	71
4.5	Kapasitas Kanal .....	75
4.6	Uji Kinerja Sistem Modulasi Adaptif dengan Channel Coding pada Kanal Frekuensi Selektif Fading .....	76
4.6.1	Perbandingan Hasil Simulasi Modulasi Adaptif dengan dan Tanpa <i>Channel Coding</i> serta Modulasi Non-Adaptif pada Kanal Frekuensi Selektif Fading .....	76
4.6.2	<i>Threshold</i> Pertama (0.2 dan 0.4) .....	79
4.6.3	<i>Threshold</i> Kedua (0.3 dan 0.5) .....	82
4.6.4	<i>Threshold</i> Ketiga (0.5 dan 0.7) .....	85
4.7	Spektrum Power Spectral Density .....	88
BAB 5 KESIMPULAN .....		91
5.1	Kesimpulan .....	91
5.2	Saran .....	92
DAFTAR PUSTAKA .....		93
LAMPIRAN A .....		95
LAMPIRAN B .....		99
BIODATA PENULIS .....		111

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Arsitektur dan Kerangka Kerja WAVE [19].....	10
Gambar 2.2 Spektrum frekuensi pada OFDM [21].....	12
Gambar 2.3 Model Sistem <i>Adaptive Modulation Code</i> [14] .....	16
Gambar 2.4. Konstelasi modulasi BPSK [12].....	17
Gambar 2.5. Konstelasi Modulasi QPSK [12] .....	18
Gambar 2.6 Konstelasi Modulasi 16-QAM [12].....	19
Gambar 2.7 Diagram Blok Sistem Transmisi dengan <i>Channel Coding</i> [16].....	19
Gambar 2.8 Karakteristik Kanal Rayleigh Fading .....	28
Gambar 2.9 Kapasitas Kanal SISO dengan CSI sempurna [27] .....	30
Gambar 3.1 Diagram <i>Fishbone</i> Penelitian .....	34
Gambar 3.2 Diagram Blok OFDM pada Modulasi Adaptif dengan Kanal Frekuensi Selektif Fading .....	36
Gambar 3.3 Representasi Gain Kanal ke dalam Alokasi Bit pada Tiap Subcarrier .....	38
Gambar 3.4 Koefisien Gain Kanal di Setiap Subcarrier .....	38
Gambar 3.5 Penentuan <i>Threshold</i> Berdasarkan Grafik CCDF Gain Kanal .....	40
Gambar 3.6 Proses Implementasi <i>Channel Coding</i> pada <i>Encoder</i> di <i>Transmitter</i> .....	42
Gambar 3.7 Hasil Simulasi MATLAB Pola Satu Blok Data OFDM dengan <i>Channel Coding</i> pada Proses <i>Encoding</i> .....	43
Gambar 3.8 Proses Implementasi <i>Channel Coding</i> pada <i>Decoder</i> di <i>Receiver</i> ....	44
Gambar 3.9 Hasil Simulasi MATLAB Pola Satu Blok Data OFDM dengan <i>Channel Coding</i> pada Proses <i>Decoding</i> .....	44
Gambar 3.10 pdf dari Distribusi Gaussian noise AWGN .....	45
Gambar 3.11 pdf dari Distribusi Rayleigh Kanal Frekuensi Selektif Fading .....	47
Gambar 3.12 Simulasi BER BPSK pada Kanal AWGN .....	48
Gambar 3.13 Konstelasi Simbol Modulasi BPSK .....	49
Gambar 3.14 Simulasi BER QPSK pada Kanal AWGN .....	50
Gambar 3.15 Konstelasi Simbol Modulasi QPSK .....	50
Gambar 3.16 Simulasi BER 16-QAM pada Kanal AWGN.....	52
Gambar 3.17 Konstelasi Simbol Modulasi 16-QAM.....	52
Gambar 3.18 Simulasi BER BPSK pada Kanal Rayleigh .....	54
Gambar 3.19 Simulasi BER QPSK pada Kanal Rayleigh .....	54
Gambar 3.20 Simulasi BER 16-QAM pada Kanal Rayleigh.....	55
Gambar 4.1 Kinerja BER pada Kanal AWGN dengan Modulasi Non-Adaptif ...	58
Gambar 4.2 Kinerja Modulasi Adaptif pada Kanal AWGN dengan Variasi <i>Threshold</i> .....	60
Gambar 4.3 Konstelasi Simbol BPSK dengan SNR 20 dB .....	61
Gambar 4.4 Konstelasi Simbol QPSK dengan SNR 20 dB .....	62
Gambar 4.5 Konstelasi Simbol 16-QAM dengan SNR 20 dB.....	62
Gambar 4.6 Perbandingan Hasil Kinerja Modulasi Adaptif dengan Modulasi Non- Adaptif pada Kanal Frekuensi Selektif Fading .....	64

Gambar 4.7 Kinerja BER dengan Variasi <i>Threshold</i> pada sistem Modulasi Adaptif dengan $fd = 0.000128$ .....	66
Gambar 4.8 Kinerja BER dengan Variasi <i>Threshold</i> pada sistem Modulasi Adaptif dengan $fd = 0.00128$ .....	68
Gambar 4.9 Kinerja BER dengan Variasi <i>Threshold</i> pada sistem Modulasi Adaptif dengan $fd = 0.0128$ .....	70
Gambar 4.10 Grafik CCDF dengan Variasi Frekuensi Doppler Normalisasi .....	71
Gambar 4.11 Variasi Doppler pada Kapasitas Modulasi Adaptif dengan <i>Threshold</i> 0.3 dan 0.5 .....	74
Gambar 4.12 Variasi Doppler pada Kapasitas Modulasi Adaptif dengan <i>Threshold</i> 0.2 dan 0.4 .....	74
Gambar 4.13 Variasi Doppler pada Kapasitas Modulasi Adaptif dengan <i>Threshold</i> 0.5 dan 0.7 .....	74
Gambar 4.14 Perbandingan Kapasitas Kanal AWGN dan Rayleigh Fading .....	75
Gambar 4.15 Perbandingan Hasil Kinerja Modulasi Adaptif dengan dan Tanpa <i>Channel Coding</i> serta Modulasi Non-Adaptif pada Kanal Frekuensi Selektif Fading .....	78
Gambar 4.16 Perbandingan Kapasitas Sistem untuk Semua Modulasi pada Kanal Frekuensi Selektif Fading .....	79
Gambar 4.17 Kinerja Modulasi Adaptif dengan <i>Channel Coding</i> pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan $fd = 0.000128$ serta <i>threshold</i> 0.2 & 0.4 .....	80
Gambar 4.18 Kinerja Modulasi Adaptif dengan <i>Channel Coding</i> pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan $fd = 0.00128$ serta <i>threshold</i> 0.2 & 0.4.....	81
Gambar 4.19 Kinerja Modulasi Adaptif dengan <i>Channel Coding</i> pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan $fd = 0.0128$ serta <i>threshold</i> 0.2 & 0.4.....	81
Gambar 4.20 Kinerja Modulasi Adaptif dengan <i>Channel Coding</i> pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan $fd = 0.000128$ serta <i>threshold</i> 0.3 & 0.5 .....	83
Gambar 4.21 Kinerja Modulasi Adaptif dengan <i>Channel Coding</i> pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan $fd = 0.00128$ serta <i>threshold</i> 0.3 & 0.5.....	84
Gambar 4.22 Kinerja Modulasi Adaptif dengan <i>Channel Coding</i> pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan $fd = 0.0128$ serta <i>threshold</i> 0.3 & 0.5.....	84
Gambar 4.23 Kinerja Modulasi Adaptif dengan <i>Channel Coding</i> pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan $fd = 0.0128$ serta <i>threshold</i> 0.5 & 0.7.....	86
Gambar 4.24 Kinerja Modulasi Adaptif dengan <i>Channel Coding</i> pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan $fd = 0.0128$ serta <i>threshold</i> 0.5 & 0.7.....	87
Gambar 4.25 Kinerja Modulasi Adaptif dengan <i>Channel Coding</i> pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan $fd = 0.0128$ serta <i>threshold</i> 0.5 & 0.7.....	87
Gambar 4.26 Perbandingan hasil PSD dengan dan tanpa Efek Doppler.....	89

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbedaan antara protokol IEEE 802.11p dan IEEE 802.11a.....	14
Tabel 2.2 Modulasi Sinyal QPSK [12] .....	17
Tabel 2.3 Polinomial GF(2) .....	21
Tabel 3.1 Parameter Simulasi Sistem.....	37
Tabel 3.2 Skenario Pembagian Daerah Modulasi Adaptif Berdasarkan Gain Kanal .....	39
Tabel 3.3 Parameter <i>Threshold</i> Modulasi Adaptif untuk Simulasi.....	42
Tabel 4.1 Perbandingan Kinerja Modulasi Non-Adaptif untuk BER $10^{-4}$ pada Kanal AWGN.....	58
Tabel 4.2 Perbandingan Kinerja Adaptif untuk BER $10^{-4}$ pada Kanal AWGN....	60
Tabel 4.3 Perbandingan Alokasi Bit pada Variasi <i>Threshold</i> Modulasi Adaptif untuk kanal AWGN.....	60
Tabel 4.4 Perbandingan Kinerja Fix Modulasi untuk BER $10^{-3}$ pada Kanal Frekuensi Selektif Fading .....	64
Tabel 4.5 Perbandingan Kinerja Adaptif untuk BER $10^{-3}$ pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan $fd = 0.000128$ .....	66
Tabel 4.6 Perbandingan Kapasitas Modulasi Adaptif dan Non-Adaptif pada kanal Frekuensi Selektif Fading dengan $fd = 0.000128$ .....	66
Tabel 4.7 Perbandingan Kinerja Adaptif untuk BER $10^{-3}$ pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan $fd = 0.00128$ .....	68
Tabel 4.8 Perbandingan Kapasitas Modulasi Adaptif dan Non-Adaptif pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan $fd = 0.00128$ .....	68
Tabel 4.9 Perbandingan Kinerja Adaptif untuk BER $10^{-2}$ pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan $fd = 0.0128$ .....	70
Tabel 4.10 Perbandingan Kapasitas Modulasi Adaptif dan Non-Adaptif pada kanal Frekuensi Selektif Fading dengan $fd = 0.0128$ .....	70
Tabel 4.11 Perbandingan Kinerja Fix Modulasi untuk BER $10^{-3}$ pada Kanal Frekuensi Selektif Fading .....	78
Tabel 4.12 Kinerja Modulasi Adaptif dengan Channel Coding untuk BER $10^{-4}$ pada Kanal Frekuensi Selektif Fading di <i>threshold</i> 0.2 dan 0.4 .....	82
Tabel 4.13 Kinerja Modulasi Adaptif dengan Channel Coding untuk BER $10^{-4}$ pada Kanal Frekuensi Selektif Fading di <i>threshold</i> 0.3 dan 0.5 .....	85
Tabel 4.14 Kinerja Modulasi Adaptif dengan Channel Coding untuk BER $10^{-4}$ pada Kanal Frekuensi Selektif Fading di <i>threshold</i> 0.5 dan 0.7 .....	88

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

VANET merupakan bagian dari pengembangan teknologi *Intelligent Transport System (ITS)* yang diharapkan mampu memecahkan masalah transportasi yang sering terjadi. VANET hadir untuk meningkatkan kenyamanan dalam berkendara serta menawarkan solusi keamanan dan keselamatan transportasi publik untuk mengurangi jumlah kemacetan dan kecelakaan lalu lintas [1]. Namun, implementasi dari sistem komunikasi VANET rentan akan dua hal yang pertama yaitu rentan terhadap frekuensi selektif fading karena kondisi *Doppler spread* yang jauh lebih besar daripada periode simbol OFDM dan kedua rentan terhadap efek Doppler yang menimbulkan *time selective* karena kondisi lingkungan kanal yang dinamis. Sehingga hal itu mengakibatkan *orthogonalitas* antar subcarrier pada sistem OFDM terganggu dan menyebabkan terjadinya *Inter-Carrier-Interference (ICI)* antar subcarrier [2]-[3]. Lebih jelasnya ICI terjadi karena sensitif terhadap frekuensi offset yang disebabkan oleh efek Doppler pada kanal bergerak (*mobile channel*). Hal itu dapat menyebabkan *Doppler spread*. *Doppler spread* merupakan parameter yang merepresentasikan ukuran dari pelebaran spektrum karena pergerakan relatif yang disebabkan antara kanal pemancar dan penerima. *Doppler spread* akan menunjukkan informasi dari lebar spektrum sinyal yang mengganggu ortogonalitas dari *inter-subcarrier* atau yang biasa disebut sebagai ICI. Jika terjadi ICI dalam suatu sistem OFDM maka kualitas sinyal terima akan menurun dan banyak terjadi *error* pada penerima sehingga dapat menurunkan kinerja sistem itu sendiri.

Maka, peningkatan sistem komunikasi dapat dilakukan dengan teknik pengalokasian daya dan modulasi adaptif pada OFDM [4]. Pengalokasian daya bertujuan untuk mengatasi fading yang mengalami penurunan kualitas sinyal ketika sampai di penerima. Sehingga, jika suatu sistem menginginkan BER tertentu maka daya yang dikirim harus dialokasikan di tiap subcarrier sesuai dengan kondisi kanal. Misalnya modulasi orde rendah seperti BPSK, QPSK lebih tahan terhadap noise

namun jumlah data yang dikirimkan sedikit. Sebaliknya modulasi 16-QAM memiliki tingkat pengiriman data yang tinggi namun mudah terkena noise. Selain itu, implementasi dari penggunaan modulasi adaptif ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja sistem dalam hal efisiensi bandwidth, reduksi nilai SNR dan BER [5]-[6]. Pada modulasi adaptif, terjadi estimasi kanal sehingga pemilihan modulasi bisa disesuaikan dengan kondisi kanal.

Ada pun beberapa penelitian sebelumnya yaitu penelitian pertama mengenai modulasi adaptif pada sistem OFDM dilakukan pada tahun 1989 oleh Kalet dan dikembangkan oleh Chow [7] dan Czulwik [8]. Pada penelitian ini mereka menyebutkan bahwa terjadi penurunan nilai SNR sekitar 5-15 dB untuk target BER  $10^{-3}$  jika dibandingkan dengan sistem OFDM konvensional atau tanpa teknik modulasi adaptif.

Pada penelitian [9], adaptive OFDM (AOFD) diusulkan pada kondisi kanal fading. Skema AOFD ini mengadaptasi nilai SNR tiap subcarrier, namun tidak untuk serial adaptif pada umumnya, yang mana digunakan untuk mengatasi masalah kondisi kanal fading. Hasil yang didapatkan mendekati optimum BER untuk komunikasi generasi ke 4 (4G) jika dibandingkan dengan modulasi serial adaptif pada OFDM.

*Channel tapped delay line* diusulkan pada [9]-[10] untuk mensimulasi model V2V dengan skema modulasi adaptif. Penelitian tersebut melihat kecenderungan antara nilai BER yang diinginkan dengan kapasitas kanal yang didapatkan berdasarkan kondisi kanal *mobile*.

Oleh karena itu, pada penelitian ini mengusulkan implementasi modulasi adaptif pada group subcarrier OFDM [11] dengan kondisi kanal frekuensi selektif fading di lingkungan VANET. Modulasi adaptif ini menerapkan skema modulasi yang berbeda-beda untuk setiap subcarrier. Tidak seperti serial adaptif pada umumnya yang menerapkan parameter sama untuk semua simbol data dalam mentransmisikan data. Selain itu, penambahan *channel coding* pada modulasi adaptif dimaksudkan untuk memitigasi efek Doppler. Sehingga, fokus pada penelitian ini adalah analisis dari BER terhadap beberapa kondisi yang mengindikasikan kinerja sistem yang diusulkan. Selain itu, ada tiga *threshold* yang



diujikan untuk melihat kapasitas sistem dari penggunaan ketiga modulasi jika diaplikasikan pada modulasi adaptif.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana perbandingan kinerja modulasi adaptif dan modulasi non-adaptif dalam mitigasi frekuensi selektif fading dengan pengaruh efek Doppler pada teknologi VANET?
2. Bagaimana implementasi *channel coding* pada modulasi adaptif untuk mencegah terjadinya efek Doppler pada teknologi VANET?
3. Bagaimana pengaruh frekuensi selektif fading dalam OFDM dengan modulasi adaptif pada VANET?
4. Bagaimana unjuk kerja modulasi adaptif berdasarkan kapasitas kanalnya dengan kondisi frekuensi selektif fading pada sistem OFDM untuk VANET?

## **1.3 Tujuan**

Tujuan yang diharapkan tercapai setelah selesainya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk membandingkan kinerja modulasi adaptif dan non-adaptif dalam mitigasi frekuensi selektif fading yang juga tahan terhadap frekuensi Doppler pada teknologi VANET.
2. Untuk mengetahui pengaruh *channel coding* pada modulasi adaptif terhadap nilai BER.
3. Untuk meningkatkan kinerja sistem OFDM karena adanya pengaruh frekuensi selektif fading yang ditimbulkan oleh efek Doppler pada teknologi VANET.
4. Untuk meningkatkan kapasitas sistem OFDM pada modulasi adaptif dengan kondisi kanal frekuensi selektif fading dan efek Doppler.

#### 1.4 Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan permasalahan yang ada, maka hal-hal yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah :

1. Menganalisis pengaruh *channel coding* pada modulasi adaptif untuk sistem OFDM pada VANET.
2. Membandingkan kinerja BER dan kapasitas kanal antara modulasi adaptif dan non-adaptif.
3. Menggunakan 8 subcarrier untuk merepresentasikan kondisi kanal frekuensi selektif fading.
4. Menggunakan implementasi modulasi adaptif dengan *channel coding* yang diaplikasikan menggunakan kode *Hamming* (7,4).
5. Teknologi VANET menggunakan frekuensi 5.85 Ghz.
6. Frekuensi Doppler normalisasi yang diujikan pada modulasi adaptif yaitu 0.000128, 0.00128, 0,0128.

#### 1.5 Kontribusi

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi yang berupa implementasi *channel coding* pada modulasi adaptif dapat meningkatkan kinerja BER dan kapasitas kanal sistem dengan kondisi kanal frekuensi selektif fading dan terdapat pengaruh dari efek Doppler sehingga menyebabkan *time selective* pada sistem OFDM untuk VANET.

#### 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan merupakan rincian laporan penulisan tesis yang berisi tentang penjelasan mengenai tahapan-tahapan yang dilakukan selama penelitian. Berikut merupakan penjelasan dari tahapan-tahapan dari penulisan tesis tersebut :

##### BAB 1 PENDAHULUAN

Pada bab 1 berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, kontribusi penulis, dan sistematika penulisan.

## BAB 2 KAJIAN PUSTAKA

Pada bab 2 menjelaskan terkait kajian pustaka dari penelitian yang akan dilakukan yaitu membahas mengenai teknologi VANET, sistem komunikasi OFDM, modulasi adaptif, efek Doppler, model sistem kanal frekuensi selektif fading, *channel coding*, perhitungan nilai BER dari kanal AWGN dan Rayleigh, serta kapasitas kanal dalam sistem OFDM.

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab 3 menjelaskan tentang metodologi penelitian dalam mendesain sistem OFDM pada modulasi adaptif yang diimplementasikan untuk teknologi VANET dengan melihat kondisi frekuensi selektif fading dan efek Doppler akibat lingkungan yang dinamis. Penggunaan *channel coding* yang diaplikasikan pada modulasi adaptif bertujuan untuk mendapatkan nilai BER yang optimum, dalam artian dapat mereduksi nilai BER jika dibandingkan dengan modulasi adaptif tanpa *channel coding*. Selain itu, terdapat penjelasan mengenai parameter simulasi sistem dan model cara adaptif pada sistem yang diteliti.

## BAB 4 : HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pada bab 4 berisi tentang hasil simulasi penelitian menggunakan MATLAB dengan kondisi kanal AWGN dan frekuensi selektif fading beserta analisisnya. Selain itu, terdapat pembahasan mengenai kondisi kanal berdasarkan variasi frekuensi Doppler normalisasi yang direpresentasikan menggunakan grafik CCDF. Variasi *threshold* pun digunakan untuk menentukan kinerja dari kondisi modulasi adaptif yang ditandai dengan perolehan nilai BER dalam masing-masing *threshold*. Perbandingan kinerja sistem yang dibahas yang pertama mengenai kinerja dari kondisi modulasi adaptif dengan modulasi non-adaptif, yang kedua mengenai kinerja modulasi adaptif dengan dan tanpa *channel coding*. Terakhir, analisis dari kapasitas sistem juga dibahas untuk mengetahui performansi dari kinerja modulasi adaptif dalam meningkatkan kapasitas sistem OFDM.

## BAB 5 : PENUTUP

Bab 5 menjelaskan isi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan serta terdapat pemberian saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 2**

### **KAJIAN PUSTAKA**

#### **2.1 Pendahuluan**

Pada bab 2 berisi tentang tinjauan pustaka dari penelitian yang akan dilakukan yaitu mengenai teknologi VANET, sistem komunikasi OFDM, pengaruh efek Doppler, model kanal *multicarrier*, modulasi adaptif, *channel coding*, BER pada kanal AWGN dan Rayleigh, kapasitas kanal. Selain itu, terdapat pembahasan mengenai literatur dari penelitian terkait yang pernah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya pada sub bab 2.1. Kajian penelitian terkait ini bertujuan untuk memuat tentang hasil penelitian sebelumnya yang berupa penelitian yang dilakukan oleh orang lain dan/atau penulis sendiri. Sehingga, peneliti dapat melihat sejauh mana penelitian terkait judul tesis sudah pernah dilakukan atau dipublikasikan serta melihat urgensi dari penelitian tesisnya. Selanjutnya, bab-bab berikutnya membahas mengenai tinjauan pustaka dari penelitian terkait.

#### **2.2 Kajian Penelitian Terkait**

Penelitian yang akan dilakukan ini terkait dengan bagian dari teknologi *Intelligent Transport System* (ITS) yang diimplementasikan pada kendaraan yaitu mengenai *Vehicular Ad-hoc Networks* (VANETs). Pada penelitian VANETs mengacu standart dari IEEE 802.11p menggunakan frekuensi *carrier* sebesar 5.85 Ghz. Modulasi yang digunakan pada komunikasi VANET adalah modulasi adaptif dengan sistem komunikasi OFDM. Pemilihan modulasi adaptif digunakan karena kondisi lingkungan yang mudah berubah dengan cepat terhadap waktu atau kondisi kanalnya dinamis. Ada pun beberapa penelitian terkait sebelumnya yang menjadi dasar dan acuan dalam melakukan penelitian ini akan dijelaskan sebagai berikut.

Penelitian pertama mengenai modulasi adaptif dilakukan pada tahun 1989 oleh Kalet yang kemudian dikembangkan oleh Chow [5] dan Czylik [6]. Pada penelitian ini menyebutkan bahwa hasil simulasi penggunaan modulasi adaptif dapat menurunkan nilai SNR sekitar 5-15 dB untuk target BER  $10^{-3}$  jika

dibandingkan dengan sistem OFDM konvensional yaitu sistem OFDM tanpa teknik modulasi adaptif.

Penelitian selanjutnya terkait tentang VANET dengan modulasi adaptif yang dilakukan oleh E.A Feukeu, K. Djouani, dan A. Kurien. Pada penelitian tersebut menggunakan metode *Automatic Doppler Shift Adaptation* (ADSA) untuk mitigasi efek Doppler menggunakan modulasi adaptif. Penelitian sebelumnya dari beberapa publikasi menyebutkan bahwa penggunaan BPSK dengan *code rate* 1/2 dapat mengatasi tingkat efek Doppler dengan baik pada lingkungan WLAN [17]. Namun, dengan metode ADSA ini ternyata menghasilkan BER dan *data rate* yang lebih baik jika dibandingkan dengan BPSK rate 1/2 jika diimplementasikan pada kondisi lingkungan VANET.

Penelitian terkait lain mengenai modulasi adaptif pada OFDM yang dilakukan oleh Chang-Soon Choi, Yozo Shoji, dan Hiroyo Ogawa pada tahun 2011 membahas mengenai kinerja OFDM dalam menghadapi frekuensi selektif fading. Modulasi adaptif yang digunakan untuk penelitian tersebut mengelompokkan 192 subcarrier menjadi 24 kelompok subcarrier yang dimodulasi secara *independen* berdasarkan karakteristik kanal di setiap kelompok *subcarrier*. Hasil penelitian itu menunjukkan nilai BER yang lebih rendah jika dibandingkan dengan modulasi adaptif yang pernah diteliti sebelumnya yaitu modulasi adaptif serial. Penggunaan modulasi adaptif serial itu konsepnya mengirimkan sinyal yang ditransmisikan dengan modulasi yang sama untuk semua subcarrier tergantung dari *threshold* nilai SNR yang sudah ditentukan [11]. Penelitian ini diimplementasikan untuk komunikasi millimeter-wave dengan karakteristik kanal indoor 60 Ghz.

Penelitian lain yaitu mengenai model kanal bergerak karena efek Doppler pada lingkungan VANET dengan frekuensi 5Ghz oleh Sunk-Kuk Noh, Phil-jung Kim, Jung-Hyun Yoon. Model kanal untuk sistem komunikasi bergerak direpresentasikan dengan *tapped delay lines* karena bersifat *time-varying*. Dalam penelitian ini menunjukka bahwa pergerakan salah satu terminal (bisa *mobile station* atau *base station*) menyebabkan efek Doppler dan terjadi *time-selective* karena *multipath* [10].

Penelitian selanjutnya yaitu oleh Chang-Jun Ahn dan Iwao Sasase mengenai efek dari modulasi adaptif pada kanal bergerak dengan mempertimbangkan

beberapa parameter seperti BER dan frekuensi Doppler. Penelitian tersebut menggunakan algoritma *Mean Last Square* (MLS) untuk mengurangi waktu transmisi dari *feedback information* dari penerima ke pengirim. Hasilnya menunjukkan bahwa menggunakan metode ini didapatkan nilai *throughput* tertinggi pada SNR 27 dB jika dibandingkan dengan *fix modulation* dengan frekuensi Doppler ( $f_d$ ) 80 Hz, artinya estimasi kanalnya sangat bagus [18].

Pada penelitian mengenai adaptive OFDM (AOFDM) diusulkan pada kondisi kanal fading oleh J.Faezah and K.Sabira [9]. Skema AOFDM ini mengadaptasi nilai SNR tiap subcarrier, namun tidak untuk serial adaptif pada umumnya, yang mana digunakan untuk mengatasi masalah kondisi kanal fading. Hasil yang didapatkan kinerja BER optimum artinya dapat mencapai nilai BER yang diinginkan jika dibandingkan dengan modulasi serial adaptif pada OFDM. Namun dalam hal ini implementasi modulasi adaptif yang digunakan untuk komunikasi generasi ke 4 (4G).

Dari beberapa acuan yang sudah pernah diteliti sebelumnya, maka pada penelitian ini akan diperoleh implementasi *channel coding* pada modulasi adaptif untuk kanal bergerak yang pada teknologi VANET dengan memperhitungkan beberapa parameter seperti nilai SNR, frekuensi selektif fading, dan pengaruh frekuensi Doppler. Sehingga fokus penelitian ini adalah untuk mendapatkan nilai BER yang diinginkan kemudian dibandingkan dengan modulasi non-adaptif pada kanal frekuensi selektif fading. Selain itu, ada tiga *threshold* yang diujikan untuk menganalisis kapasitas sistem dari penggunaan ketiga modulasi jika diaplikasikan pada modulasi adaptif.

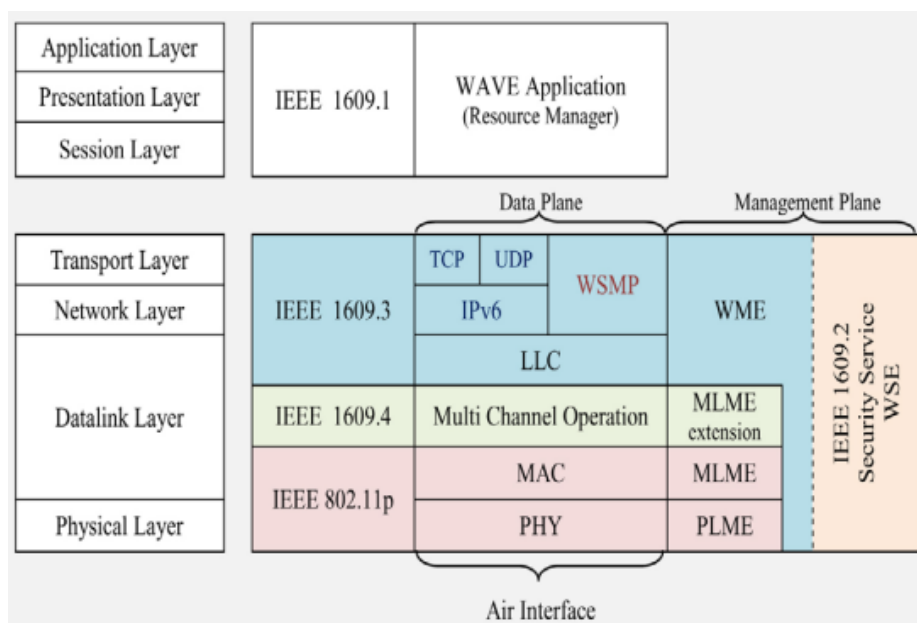
### 2.3 VANET

Munculnya *Vehicular Ad-hoc Networks* (VANETs) merupakan bagian dari pengembangan teknologi *Intelligent Transport System* (ITS) yang diharapkan menjadi metode lanjutan dalam memecahkan masalah pada sistem transportasi. VANET diharapkan mampu menjadi solusi baru untuk strategi manajemen dan rekayasa lalu lintas. Tujuan utamanya yaitu untuk memprioritaskan keselamatan dan mengurangi prosentase kecelakaan lalu lintas yang sering terjadi. Selain itu, teknologi ITS juga dapat dijadikan sebagai metode lanjutan dari sistem informasi

yang dibangun dengan mengintegrasikan manusia, kendaraan dan lingkungan dalam suatu sistem informasi dan komunikasi yang terpadu.

Dalam rangka penerapan teknologi VANETs, proses pengembangan tidak hanya berfokus pada pemodelan kinerja jaringan saja. Namun, perhatian lainnya agar penerapan teknologi ini dapat diimplementasikan pada dunia nyata adalah masalah pemodelan mobilitas lalu lintas dan kendaraan yang realistis [19]. VANET ini merupakan jenis teknologi nirkabel yang dikhususkan untuk kendaraan dengan perangkat infrastruktur jaringan.

Untuk pengembangan teknologi VANETs, IEEE sebagai induk organisasi professional yang salah satu tugasnya yaitu mengatur regulasi dan standar internasional penggunaan sistem komunikasi sejumlah protokol untuk pengoperasian teknologi tersebut yang dinamakan *Wireless Access in Vehicular Environment (WAVE) standard*. Standar WAVE ditetapkan sebagai dasar untuk pengembangan dan penerapan teknologi VANETs yang digunakan pada masa kini maupun masa yang akan datang. Melalui standar ini, pembangunan sistem transportasi berbasis informasi dan komunikasi secara terpadu dapat terwujud. WAVE merupakan standar yang difokuskan pada komunikasi pertukaran pesan pada kendaraan.



Gambar 2.1 Arsitektur dan Kerangka Kerja WAVE [19]



Pada Gambar 2.1 [19] ditunjukkan sebuah arsitektur dan kerangka kerja WAVE yang didukung oleh beberapa jenis protokol yang saling terkait yaitu meliputi : IEEE 802.11p, IEEE 1609.1, IEEE 1609.2, IEEE 1609.3, dan IEEE 1609.4. Protokol IEEE 802.11p merupakan standar untuk pengoperasian lapisan fisik (PHY) dan sebagian lapisan *datalink* (MAC). Sedangkan untuk protokol IEEE 1609.1 merupakan standar yang dirancang untuk pengoperasian berbagai jenis aplikasi di lokasi *remote* sehingga dapat memungkinkan terjadinya komunikasi antar perangkat OBU (*Onboard Unit*) yang diinstall pada kendaraan melalui perangkat RSU (*Road Side Unit*) yang terinstal pada infrastruktur sepanjang jalan. Protokol IEEE 1609.2 merupakan standar untuk layanan keamanan, protokol IEEE 1609.3 merupakan standar yang mengatur penggunaan kanal. Sedangkan protokol IEEE 1609.4 merupakan standar yang mengatur pengoperasian jenis pertukaran paket data [20].

Lingkup dalam penelitian ini hanya berdasarkan pada salah satu standar yaitu IEEE 802.11p yang didalamnya terdapat sistem OFDM dan beroperasi pada frekuensi kerja 5.9 Ghz.

## 2.4 OFDM

OFDM adalah teknik modulasi *multicarrier* di mana antar subcarrier satu dengan yang lainnya saling tegak lurus (*orthogonal*). Konsep teknik OFDM pada prinsipnya membagi laju transmisi berkecepatan tinggi menjadi beberapa laju berkecepatan rendah yang ditransmisikan secara simultan dengan menggunakan *subchannel* atau *subcarrier* yang saling *orthogonal* untuk mengoptimalkan efisiensi transmisi data. Jadi setiap *subcarrier* memiliki frekuensi yang saling *orthogonal* sehingga membuat setiap *subcarrier overlap* namun tidak saling menimbulkan interferensi karena penambahan *guard interval* pada setiap frekuensi *subcarrier*. Sehingga hal itu dapat meningkatkan efisiensi bandwidth seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.

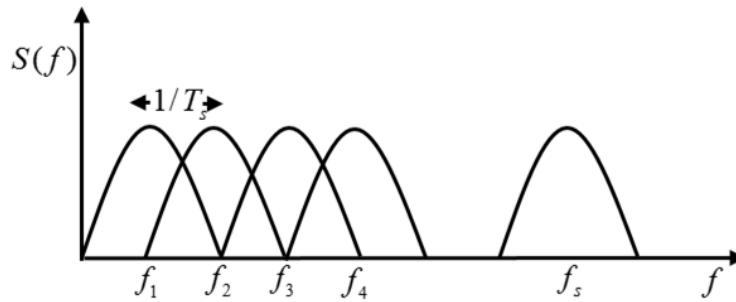
Pada Gambar 2.2 dapat dilihat bahwa teknik OFDM memberikan keuntungan dalam hal penghematan *bandwidth* karena di antara *subcarrier* satu dengan yang lainnya tidak ada jarak *bandwidth* yang memisahkan. Untuk jarak

setiap frekuensi *subcarrier* agar *orthogonal* minimal harus dipisahkan sejauh  $1/T_s$  dan dapat dinyatakan pada persamaan 2.1 [21].

$$\Delta f = \frac{1}{T_s} \quad (2.1)$$

Di mana  $\Delta f$  menunjukkan *frequency carrier spacing* dan  $T_s$  menunjukkan *interval* simbol OFDM. Secara pendekatan matematis, untuk keorthogonalan OFDM dapat dijelaskan melalui persamaan 2.2, misalkan fungsi dari  $X_m(t)$  adalah *subcarrier* ke-m dan  $X_n(t)$  adalah *subcarrier* ke-n. Kedua *subcarrier* ini dikatakan *orthogonal* satu sama lain pada *interval*  $a < t < b$  jika memenuhi kondisi sebagai berikut [21]:

$$\int_a^b X_m(t) * X_n(t) dt = 0 \quad (2.2)$$



Gambar 2.2 Spektrum frekuensi pada OFDM [21]

Sinyal *carrier* pada sistem OFDM tersebut merupakan hasil dari penjumlahan dari *subcarrier* yang *orthogonal* dengan sinyal *baseband* pada masing-masing *subcarrier* yang dimodulasikan secara independen dengan menggunakan teknik modulasi. Proses pengiriman sinyal dari sisi pengirim, awalnya dimulai dari bit-bit dibangkitkan kemudian dimodulasi dengan modulasi yang sudah ditentukan misalnya BPSK/QPSK/16-QAM, selanjutnya data dikonversi dari serial ke paralel setelah itu masuk proses IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*), dan sebelum sinyal dikirim maka dilakukan penambahan *cyclic prefix* (CP). Selanjutnya sinyal dikirim melalui kanal dan ada penambahan blok sistem tepat setelah melewati kanal dan sebelum masuk ke penerima, yaitu terdapat noise yang masuk dan ikut ditransmisikan. Penambahan noise dilakukan pada bagian tersebut karena kondisi sinyal yang paling lemah setelah melewati kanal sehingga mudah terkena noise dan menyebabkan distorsi. Pada sisi penerima,

proses yang terjadi adalah kebalikan dari sisi pengirim yaitu dimulai dari konversi serial ke paralel dan menghilangkan *cyclic prefix*, selanjutnya masuk proses FFT (*Fast Fourier Transform*), dan kemudian demodulasi serta data dikonversi menjadi serial. Terakhir *output data* kembali berbentuk seperti bit-bit data semula.

Selanjutnya, keuntungan dari penggunaan sistem OFDM adalah mampu menghadapi *frequency selective fading*. Dengan menggunakan teknologi OFDM, meskipun jalur komunikasi yang digunakan memiliki karakteristik *frequency selective fading*, di mana *bandwidth* dari kanal lebih sempit daripada *bandwidth* dari transmisi sehingga menyebabkan pelemahan daya terima secara seragam pada beberapa frekuensi tertentu. Namun pelemahan daya yang disebabkan oleh *flat fading* ini lebih mudah dikendalikan, sehingga kinerja dari sistem mudah ditingkatkan. Sistem OFDM ini bisa mengubah *frequency selective fading* menjadi *flat fading*, karena meskipun sistem secara keseluruhan memiliki kecepatan transmisi yang sangat tinggi sehingga mempunyai *bandwidth* yang lebar, namun karena transmisi menggunakan *subcarrier* (frekuensi pembawa) dengan jumlah yang sangat banyak, maka kecepatan transmisi di tiap *subcarrier* sangat rendah dan *bandwidth* dari setiap *subcarrier* sangat sempit, lebih sempit daripada *coherence bandwidth*. Sehingga distorsi sinyal akibat kanal *multipath fading* dapat berkurang.

Oleh karena itu, seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya bahwa sistem OFDM ini akan diimplementasikan pada teknologi VANET. Sedangkan pada lapisan fisik dari teknologi VANET menggunakan protokol IEEE 802.11p, maka parameter sistem komunikasi OFDM yang digunakan untuk implementasi VANET juga mengacu pada protokol IEEE 802.11p, bukan lagi IEEE 802.11a.

Standar IEEE 802.11a merupakan sebuah standar dari komunikasi sistem OFDM yang digunakan oleh komunikasi *wireless* (WLAN). Perbedaan antara kedua protokol tersebut dapat dijelaskan seperti pada Tabel 2.1. Pada lingkungan VANET, perubahan kondisi kanal mudah berubah akibat pergerakan salah satu terminal (bisa *mobile station* atau *base station*) yang menyebabkan efek Doppler dan terjadi *time-selective* karena *multipath*.

Namun, akibat dari kanal yang mudah berubah atau biasa disebut dengan kanal *mobile* pada VANET maka hal itu dapat menyebabkan sistem OFDM rentan terkena ICI (*Inter-Carrier-Interference*). ICI pada OFDM sangat mungkin terjadi

bahkan bisa jadi masalah yang serius. ICI terjadi karena *subcarrier* digunakan kembali oleh *subcarrier* yang berada pada blok data yang sama dari pengguna yang sama. Bahkan jika hanya ada satu pengguna dalam sistem komunikasi OFDM, maka ICI juga dapat terjadi.

Faktor yang menyebabkan ICI adalah *frekuensi offset* dan *time variant*. Jenis *time variant* pada kanal dapat dimodelkan dengan noise AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) sedangkan *time variant* lainnya dapat dimodelkan sebagai frekuensi *offset* seperti pergeseran Doppler (Xiao, 2013).

Tabel 2.1 Perbedaan antara protokol IEEE 802.11p dan IEEE 802.11a

Parameter	IEEE 802.11p	IEEE 802.11a
Frequency Band	5.85 – 5.95 Ghz	5.15-5.35 Ghz; 5.725-5.835 Ghz
Data rate	Max 27 Mb/s	Max 54 Mb/s
Channel Bandwidth	10 Mhz	20 Mhz
Number of channel	7	12
OFDM signal duration	8.0	4.0
Guard Time	1.6	0.8
FFT Period	6.4	3.2
Preamble Duration	32	16

## 2.5 Model Kanal

Sistem *multi-carrier* seperti OFDM bisa disimulasikan pada domain waktu atau lebih efisien komputasinya dalam domain frekuensi. Model kanal dalam sistem yang diusulkan ini menggunakan implementasi model kanal *multi-carrier* pada domain frekuensi untuk menunjukkan frekuensi selektif fading pada sistem OFDM, hal itu dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut [13] :

$$\begin{aligned}
 H_{n,i} &= H(nF_s, iT_s') \\
 &= \sum_{p=0}^{N_p-1} a_p e^{j(2\pi(f_{D,p}iT_s' - nF_s\tau_p) + \phi_p)} \\
 &= a_{n,i} e^{j\phi_{n,i}}
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Di mana,  $H_{n,i}$  merupakan fungsi transfer dari kanal diskrit yang disampling pada waktu OFDM dengan simbol rate  $1/T_s'$  dan frekuensi spasi subcarrier sebesar  $F_s$ .

$T_s'$  adalah total durasi waktu simbol termasuk waktu guard interval. Kemudian, satu simbol yang ditransmisikan pada subcarrier atau sub-channel  $n$  dari simbol OFDM  $i$  dikalikan dan menghasilkan fading amplitude  $a_{n,i}$  yang dirotasi oleh random fasa  $\varphi_{n,i}$ . Fading menyebabkan fluktuasi amplitudo dan fasa. Fading amplitude dalam model kanal ini berdistribusi Rayleigh sedangkan random phase  $\varphi_{n,i}$  berdistribusi uniform pada interval  $[0, 2\pi]$ . Hasil nilai kompleks dari koefisien kanal fading bersifat independen untuk setiap subcarrier dan simbol OFDM. Model kanal seperti ini disebut dengan model kanal fading tidak berkorelasi (*uncorrelated fading*). Keuntungan dari model kanal dalam frekuensi domain untuk sistem *multicarrier* ini adalah implementasinya yang sederhana dan mengurangi kompleksitas.

## 2.6 Doppler Shift

Kondisi kanal pada komunikasi *vehicular* bersifat dinamis atau *time varying*. Pada sistem yang diusulkan dapat mengalami *Doppler shift* yang dapat menurunkan kinerja modulasi adaptif pada sistem OFDM. Besar dari *Doppler shift* tergantung dari pergerakan relatif di antara *transmitter*, *receiver*, dan kecepatan kendaraan. *Doppler shift* ( $F_d$ ) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut [13]:

$$F_d = f_c \frac{v}{c} \cos \alpha \quad (2.4)$$

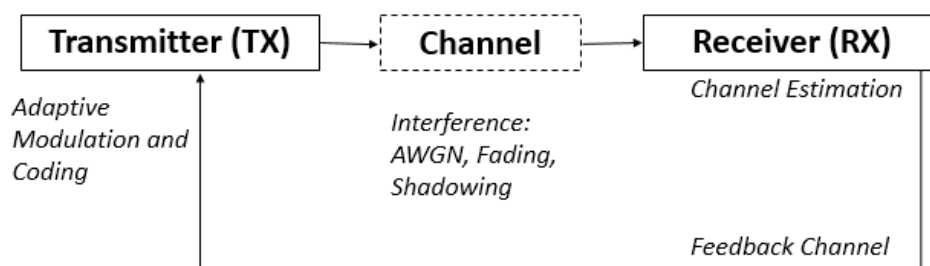
Di mana  $f_c$  merupakan frekuensi carrier,  $v$  adalah perbedaan kecepatan antar kendaraan,  $c$  menyatakan kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ), dan  $\alpha \in [0, \pi]$  merupakan sudut yang dibentuk dari vektor kecepatan. Jika perubahan sudut  $\alpha = 0$  maka akan didapatkan Doppler shift maksimum. Pada proses simulasi MATLAB efek Doppler dinyatakan dengan Doppler shift normalisasi ( $f_d$ ). Hal itu bisa dihitung dengan cara membandingkan nilai Doppler shift dengan spasi subcarrier ( $F_s$ ).

## 2.7 Modulasi

Gelombang radio merupakan gelombang elektromagnetik yang bergerak dengan kecepatan cahaya dan dapat membawa data informasi pada jarak yang cukup jauh. Gelombang radio memiliki frekuensi yang berbeda-beda sehingga memiliki sifat yang berbeda pula. Sedangkan, pada hakikatnya sinyal informasi itu terletak pada frekuensi rendah (*baseband signal*), namun ketersediaan spektrum dalam kanal komunikasi itu pada frekuensi tinggi. Sehingga, pada saat mengirimkan data sinyal perlu dimodulasi terlebih dulu.

Modulasi merupakan proses penumpangan sinyal informasi pada sinyal *carrier* yang berupa gelombang radio dengan frekuensi yang relatif lebih tinggi. Hasil dari sinyal yang dimodulasi tersebut dikenal dengan sebutan sinyal *bandpass*. Proses modulasi berfungsi untuk pemetaan informasi berdasarkan perubahan fasa gelombang, frekuensi gelombang, amplitudo gelombang, atau kombinasi dari ketiga perubahan tersebut.

Terdapat beberapa jenis modulasi yang dapat digunakan dalam sistem transmisi nirkabel. Sedangkan, pada penelitian ini menggunakan modulasi adaptif dalam mentransmisikan data sehingga modulasi yang digunakan terdiri dari modulasi BPSK, QPSK, dan 16-QAM. Penggunaan modulasi adaptif ini bertujuan untuk efisiensi kanal *bandwidth* dan model sistemnya dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.3.

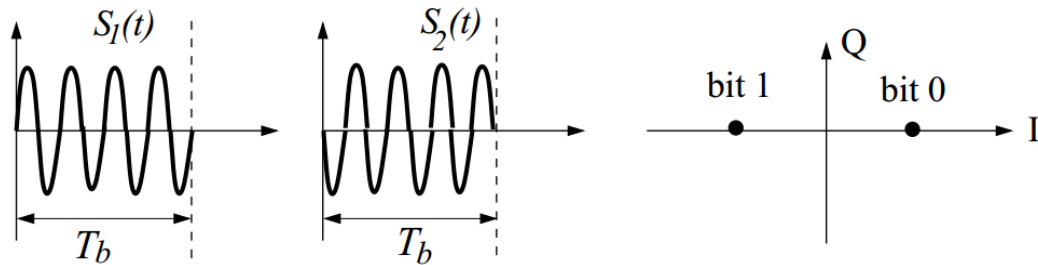


Gambar 2.3 Model Sistem *Adaptive Modulation Code* [14]

### 2.7.1 BPSK

Modulasi BPSK merupakan jenis transmisi data *M-ary* dengan  $M=2$  dan menggunakan PSK (*Phase Shift Keying*). Pada BPSK satu simbol informasi dibawa

dengan satu bit. Bit nol '0' mewakili nilai 1 dan bit '1' mewakili nilai 0 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



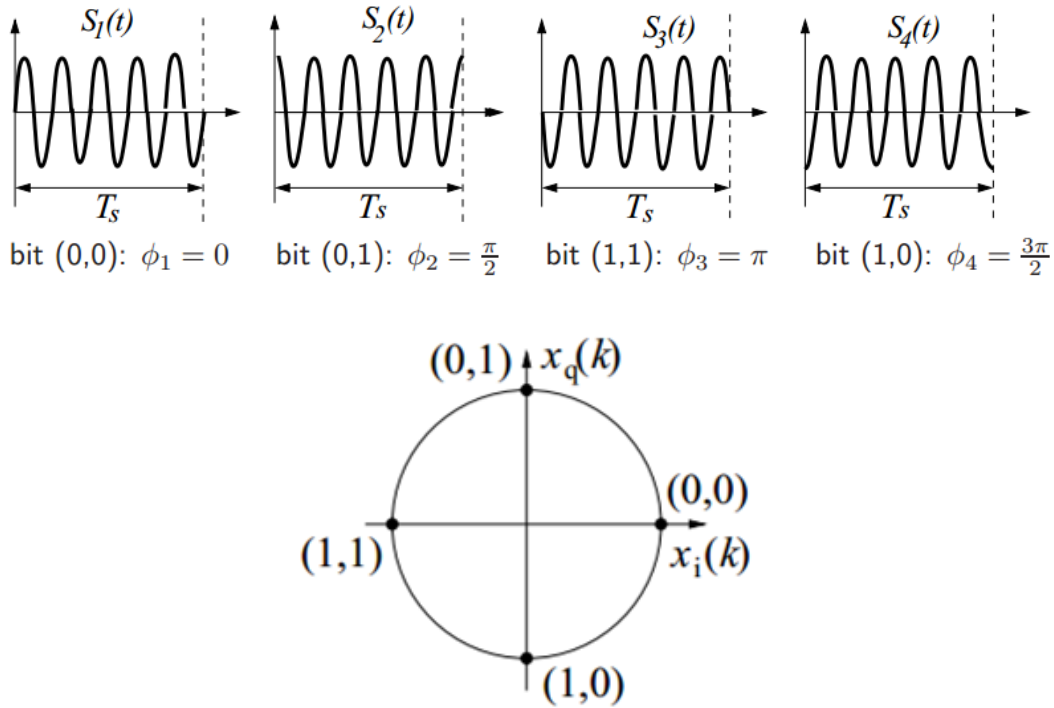
Gambar 2.4. Konstelasi modulasi BPSK [12]

### 2.7.2 QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*)

Modulasi QPSK merupakan jenis transmisi data M-ary dengan M=2 yang menggunakan PSK (*Phase Shift Keying*). QPSK merupakan modulasi dengan pemetaan fasa yang setiap simbolnya memiliki 2 bit informasi. Sehingga QPSK memiliki 4 kombinasi simbol yang dibedakan berdasarkan perbedaannya. Maka, representasi dari satu simbol QPSK dengan dua bit yaitu 00, 01, 10, dan 11 dengan minimum lebar fase  $\frac{\pi}{2}$  seperti yang terlihat pada Gambar 2.5. Sedangkan untuk bit stream yang masuk pada modulator, dibagi menjadi 2 stream yaitu sinyal *Inphase* dan *Quadrature*. *Bit stream Inphase* akan dimodulasikan dengan  $\cos(w_0 t)$  dan *Quadrature* akan dimodulasikan dengan  $\sin(w_0 t)$ . Kemudian 2 *bit stream* tersebut akan digabungkan kembali menjadi satu simbol QPSK yang memiliki beda fasa untuk masing-masing simbolnya seperti yang terlihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Modulasi Sinyal QPSK [12]

$I$	$Q$	QPSK
1	1	$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + 45^\circ)$
1	0	$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + 135^\circ)$
0	0	$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + 225^\circ)$
0	1	$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + 315^\circ)$



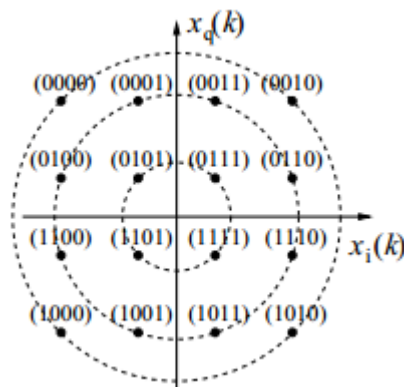
Gambar 2.5. Konstelasi Modulasi QPSK [12]

### 2.7.3 16-QAM (16-Quadrature Amplitude Modulation)

Modulasi M-QAM yang dipilih dan digunakan dalam modulasi adaptif ini adalah 16-QAM. Jenis modulasi QAM merupakan kombinasi antara PSK (*Phase Shift Keying*) dan ASK (*Amplitude Shift Keying*). Pada modulasi 16-QAM, menggunakan  $\sqrt{M}$ -ary di mana satu simbol informasi direpresentasikan dengan 4 bits. Modulasi QAM membagi sinyal yang ditransmisikan menjadi dua komponen yaitu *inphase* dan *quadrature*. Kedua bagian ini berbeda fasa 90 derajat pada masing-masing kanal, karena komponen *inphase* dikalikan dengan sinyal cosinus dan komponen *quadrature* dikalikan dengan sinyal sinus. Kedua komponen tersebut nantinya akan dikalikan dengan filter *low pass* yang dapat membentuk konstelasi sinyal seperti yang terlihat pada Gambar 2.6. Sebagai contoh untuk modulasi 16-QAM, dalam pentransmisian data dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$s(t) = I(t) \cos(w_0 t) + Q(t) \sin(w_0 t) \quad (2.5)$$

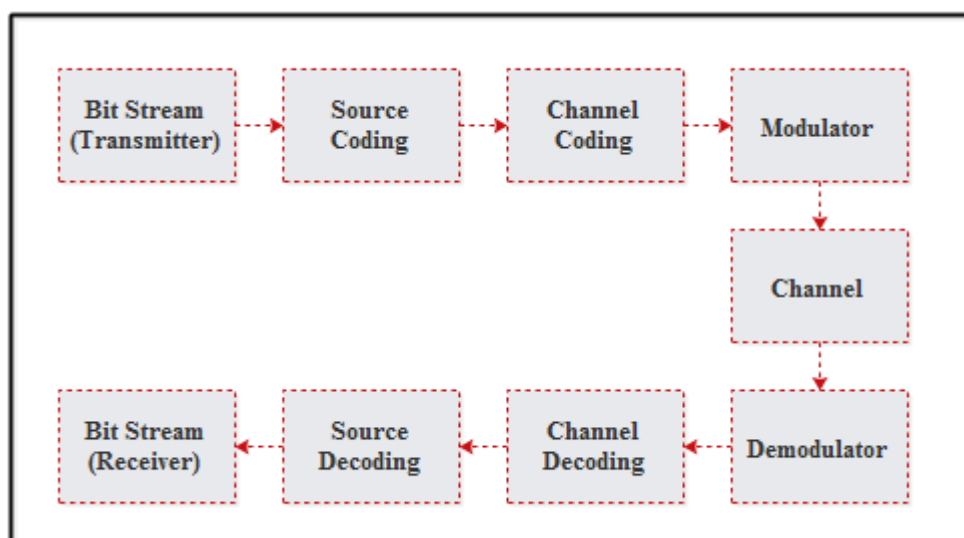




Gambar 2.6 Konstelasi Modulasi 16-QAM [12]

## 2.8 Channel Coding

Blok sistem implementasi *channel coding* untuk mentransmisikan sinyal dari pengirim ke penerima dapat dilihat pada Gambar 2.7. *Channel coding* digunakan untuk menjaga informasi atau data digital dari *error* yang mungkin terjadi selama proses pentransmisian data dengan cara menambahkan bit redundansi (*bit parity*) ke dalam bit informasi yang akan dikirimkan melewati kanal. *Channel code* yang berfungsi untuk mendeteksi kesalahan bit informasi disebut dengan *error detection code*, sedangkan yang berguna untuk mengoreksi kesalahan bit informasi disebut *error correction code*.



Gambar 2.7 Diagram Blok Sistem Transmisi dengan *Channel Coding* [16]

Teknik *channel coding* ini menambah bit redundansi ke dalam data yang akan dikirimkan sehingga hal itu akan meningkatkan rate transmisi atau bisa dikatakan menambah *bandwidth* yang dibutuhkan jika *data rate* dari data aslinya diinginkan tetap. Ada dua macam tipe dasar dari *channel coding* yaitu *block coding* dan *convolutional code*.

a. *Block Code*

*Block Code* yaitu merupakan salah satu *code* yang bersifat *Forward Error Correction (FEC)* artinya mampu mendeteksi dan mengoreksi error tanpa meminta proses transmisi ulang. Sehingga keuntungan dari FEC diantaranya adalah tidak memerlukan *back-channel* maka dapat menghemat bandwidth dan efisiensi daya. Beberapa jenis *block code* antara lain BCH *code*, Hamming *code*, dan Reed Solomon *Code*.

b. *Convolutional Code*

*Convolutional Code* adalah jenis *code* yang memiliki perbedaan mendasar dari *block code* artinya urutan bit informasi tidak dikelompokkan ke dalam blok-blok yang berbeda sebelum dikodekan.

Fokus pembahasan pada *channel coding* yang digunakan pada penelitian ini adalah menggunakan *Hamming Code*.

### 2.8.1 Kode Hamming

Kode *Hamming* diciptakan oleh Prof. Wesley Richard Hamming di laboratorium Bell pada tahun 1950 [22]. Mekanisme pendeteksian kesalahan dengan menggunakan *codeword* hasil *encode* dengan *codeword* hasil dari deteksi *decoder*. Kesalahan dapat diketahui dengan menganalisa data dan bit *parity* tersebut. Teknik pengkodean *Hamming* memiliki keunggulan yaitu sebagai berikut [23]:

- a. Mendeteksi semua kesalahan bit tunggal dan ganda sekaligus mengetahui posisi bit yang salah yang dapat dilakukan dengan cara membandingkan *codeword* hasil *encoding* dengan hasil deteksinya.

- b. Mengoreksi semua kesalahan bit tunggal. Jika terdeteksi adanya kesalahan bit dalam blok *codeword* pada proses *decoding*, maka dengan operasi XOR akan diperbaiki 1 bit *error* yang terdeteksi.

Kode *Hamming* termasuk ke dalam *linear block code*  $(n,k)$  yang dapat dibentuk dengan ketentuan parameternya sebagai berikut [24]:

$$\text{Panjang kode} : n = 2^m - 1 \quad (2.6)$$

$$\text{Jumlah bit informasi} : k = 2^m - m - 1 \quad (2.7)$$

$$\text{Jumlah bit parity} : m = n - k \quad (2.8)$$

$$\text{Kapasitas untuk koreksi kesalahan} : t = 1 (d_{\min} = 3) \quad (2.9)$$

$$\text{Jumlah kode minimum} : d_{\min} \quad (2.10)$$

Suatu kode *Hamming* bisa mempunyai *single-error correcting code* atau *double error detecting*, apabila suatu kode *Hamming* berupa *single error*, maka apabila terdapat *single error* yang muncul selama deteksi transmisi sinyal, maka nilai *resultante syndrome* adalah “bukan nol” atau *non zero* dan terdiri dari bilangan bulat (*odd number*) dari 1, apabila *double error* yang terjadi, nilai *syndrome* juga merupakan *nonzero* tetapi biasanya angka ganjil dari 1. Kode *Hamming* dikatakan *error-free* ketika *vector syndrome* pada *receiver* memiliki nilai *null vector* (*all zeros*).

### 2.8.2 Encoding Hamming

*Bit stream* dari sumber data yang masuk ke encoder dikodekan dengan menggunakan suatu generator. Langkah pertama yang harus dilakukan adalah menentukan nilai  $(n)$  dan  $(k)$ . Nilai  $(n)$  dan  $(k)$  diperoleh dari *block code*  $(n,k)$  dengan rumus  $(2^m - 1, 2^m - m - 1)$ . Selanjutnya, menentukan nilai polinomial sesuai dengan Tabel 2.3 Polinomial GF(2).

Tabel 2.3 Polinomial GF(2)

Jumlah bit parity	Polinomial
3	1101
4	11001
5	101001
6	1100001
7	10010001

Setelah diketahui nilai polinomialnya, maka matriks generatornya dapat disusun dengan langkah sebagai berikut :

- Gunakan poilinomial sebagai baris pertama dan tambahkan nilai 0 sehingga jumlah bit seluruhnya menjadi sebanyak  $n$ . Pola bit yang dihasilkan diberi nama dengan  $g(x)$
- Buat baris kedua dengan menggeser bit terakhir pada baris pertama ke bit pertama, jika dirumuskan prosesnya yaitu  $\rightarrow x \cdot g(x)$
- Pada baris selanjutnya, yaitu baris ketiga dibuat dengan cara menggeser bit terakhir pada baris kedua ke bit pertama, prosesnya yaitu  $\rightarrow x^2 \cdot g(x)$

Pergeseran bit terakhir terus dilanjutkan sampai sejumlah  $k$  baris. Sehingga matriks  $G$  yang terbentuk ada;ah sebagai berikut [25]:

$$G = \begin{bmatrix} g(x) \\ x \cdot g(x) \\ x^2 \cdot g(x) \\ x^3 \cdot g(x) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Generator yang terbentuk merupakan generator yang tidak sistematis. Cara yang dilakukan untuk mengubahnya menjadi sistematis yaitu dengan operasi baris elementer. Matriks dari  $G$  yang sistematis terbentuk dari generator kode *Hamming*.

$$G = \begin{bmatrix} g(x) \\ x \cdot g(x) \\ x^2 \cdot g(x) + (x) \\ x^3 \cdot g(x) + g(x) + x \cdot g(x) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

*Encoder* kode *Hamming* akan menghasilkan  $n$  bit *output codeword* yang terdiri dari  $k$  bit informasi dan  $m$  bit *parity*. Pada proses *encoding* menggunakan kode *Hamming*,  $n$  bit *output codeword* dihasilkan dengan mengalikan  $k$  bit matriks informasi dengan generator matriks yang mempunyai ukuran matriks  $n \times k$ . Proses pembentukan matriks *output codeword* dapat dirumuskan dengan persamaan :

$$C = [M] \cdot [G] \quad (2.13)$$

di mana :  $C = \text{Output codeword}$

$M = \text{Matriks bit informasi}$

$G = \text{Matriks generator blok}$

### 2.8.3 Decoding Hamming

Proses *decoding* terjadi di penerima karena adanya *decoder* yang berfungsi untuk mendeteksi kesalahan *syndrome error* dan memperbaiki kesalahan yang terjadi pada *syndrome error* tersebut. Cara yang dibutuhkan untuk melakukan koreksi kesalahan pada kode *Hamming* yaitu dengan cara mengetahui matriks dari *parity check* yang dirumuskan dengan persamaan berikut [25]:

$$H = [I | P^T] \quad (2.14)$$

di mana :  $H = \text{matriks hasil cek parity}$

$I = \text{matriks identitas}$

$P^T = \text{hasil transpose dari matriks parity}$

Matriks *parity* cek dapat dihitung dengan persamaab berikut :

$$S = e \cdot H^T \quad (2.15)$$

di mana :  $S = \text{Bentuk syndrome error}$

$e = \text{Bentuk error code}$

$H^T = \text{Matriks trasnpose dari parity check}$

Cara yang dilakukan untuk mengetahui *error* dalam *codeword* yaitu dilakukan perbandingan antara *syndrome error* dari kode masing-masing jenis *Hamiing* dengan *syndrome error codeword* yang diterima. *Syndrome error* diperoleh dnegan mengalikan *codeword* yang diterima dengan transpose matriks *parity check*.

### 2.8.4 Error Detection

Hasil dari nilai *syndrome error* bertujuan untuk menentukan ada atau tida *error* pada *codeword* yang diterima. Bila *error syndrome* bernilai nol, maka kode yang diterima tidak mengalami *error*. Sehingga, kode yang dikirimkan sama

dengan kode yang diterima. Namun, apabila *syndrome error* tidak bernilai nol, maka ada *error* yang terdeteksi pada sinyal yang ditransmisikan. Oleh karena itu, lakukan pencarian posisi *error* berdasarkan posisi ke berapa pola bit *syndrome* tersebut pada kolom matriks *transpose parity check*. Langkah selanjutnya yaitu mengoreksi bit-bit yang terkena *error*, yaitu dengan menginvert nilai dari kode yang diterima, apabila kode 0 menjadi 1, dan jika kode 1 menjadi 0. Sehingga nantinya akan diperoleh kode yang dikirimkan. Cara yang dilakukan untuk mendapatkan kembali bit-bit informasi dalam *codeword* yaitu dilakukan penghilangan bit-bit *parity*. Sebagai contoh, sebuah kode *Hamming* (7,4) memiliki bit informasi  $(n) = 7$ , panjang kode  $(k) = 4$ , dan bit *parity*  $(m) = 3$ . Sehingga berdasarkan Tabel 2.3 pola bit polinomial kode *Hamming*  $GF(2) = 1101$ . Generator matriks  $G$  yang terbentuk dari yang tidak sistematis ke yang sistematis yaitu sebagai berikut [25]:

$$G = \begin{bmatrix} g(x) \\ x \cdot g(x) \\ x^2 \cdot g(x) \\ x^3 \cdot g(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1101000 \\ 0110100 \\ 0011010 \\ 0001101 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$G = \begin{bmatrix} g(x) \\ x \cdot g(x) \\ x^2 \cdot g(x) + (x) \\ x^3 \cdot g(x) + g(x) + x \cdot g(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1101000 \\ 0110100 \\ 1110010 \\ 1010001 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Jika data yang diberikan oleh *source* adalah  $M = 1000$ , maka bit *output codeword* yang dihasilkan oleh *encoder* kode *Hamming* yaitu :

$$C = [M] \cdot [G] \quad (2.18)$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} 1101000 \\ 0110100 \\ 1110010 \\ 1010001 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$C = [1101000] \quad (2.20)$$

Kode *Hamming* (7,4) memiliki matriks *parity check* yaitu :

$$H = \begin{bmatrix} 1001011 \\ 0101110 \\ 0010111 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Bila kode yang diterima adalah  $e = 1101000$  , maka bentuk *syndrome error* dari kode yang diterima yaitu sebagai berikut :

$$S = e \cdot H^T \quad (2.22)$$

$$S = [1101000] \cdot \begin{bmatrix} 100 \\ 010 \\ 001 \\ 110 \\ 011 \\ 111 \\ 101 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$S = [000] \quad (2.24)$$

Hasil dari matriks *syndrome error* bernilai nol, maka kode yang diterima tidak terkena *error*. Jadi kode yang dikirimkan sama dengan kode yang diterima yaitu  $r = e = 1101000$ . Selanjutnya, bit *parity* bisa dihilangkan agar penerima mendapatkan bit informasi dalam *codeword* sesuai yang dikirimkan melalui *transmitter*.

## 2.9 Bit Error Probability (P<sub>b</sub>)

Probabilitas kesalahan bit merupakan nilai ukur kualitas sinyal yang diterima untuk sistem transmisi data digital atau bisa juga diartikan sebagai perbandingan jumlah bit yang salah terhadap total bit yang dikirimkan. *Bit Error Probability* atau yang biasa disebut dengan BER memiliki rumus yang berbeda-beda tergantung dari jenis kanal serta modulasi yang digunakan. Penjelasan mengenai kedua parameter tersebut akan diuraikan pada sub bab selanjutnya.

### 2.9.1 Kanal AWGN

Kanal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) disebut kanal ideal karena hanya ada noise AWGN sebagai pengganggu sinyal. Noise ini dapat berasal dari berbagai sumber. Sedangkan kriteria perancangan sistem komunikasi yang baik harus dapat menghilangkan berbagai macam sumber noise walaupun tetap ada satu sumber noise yang tidak dapat dihilangkan yaitu *noise thermal* yang sering menimbulkan panas. Oleh karena itu, AWGN bisa digunakan model yang baik untuk mewakili kondisi lingkungan sebenarnya selama hanya ada *noise thermal receiver* yang menjadi sumber gangguan. Efek fading dapat diabaikan, maka dapat dikatakan sistem transmisi dengan kanal AWGN adalah kanal dengan kondisi sistem paling sempurna, karena gangguan dari luar diabaikan.

Pada kanal AWGN ini memiliki karakteristik yaitu *bandwidth* yang tidak terbatas dan memiliki respon frekuensi yang tetap untuk semua frekuensi. Jika dilihat secara harfiah menurut bahasa yang membentuk, AWGN memiliki makna tersendiri, yang pertama memiliki sifat *additive* yang berarti noise dijumlahkan dengan sinyal, kedua yaitu sifat *white* pada noise artinya yaitu tidak tergantung pada frekuensi operasi sistem dan memiliki rapat daya yang konstan, ketiga yaitu *Gaussian* artinya besarnya tegangan noise memiliki probabilitas atau nilai peluang yang terdistribusi secara *Gaussian*.

Jadi jika disimulasikan dalam MATLAB noise ini dimodelkan sebagai noise AWGN. Noise didiskripsikan sebagai proses acak yang terdistribusi Gaussian dengan rata-rata (*mean*) sama dengan nol. Proses acak Gaussian  $n(t)$  merupakan fungsi acak dengan harga  $n$  pada saat  $t$ , dan dikarakteristikan secara statistik dengan fungsi probabilitas atau *Probability Density Function* (PDF) yang dinyatakan sebagai berikut [26]:

$$P(n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{n-m}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2.25)$$

Di mana  $P(n)$  merupakan probabilitas kemunculan noise,  $\sigma$  merupakan standar deviasai,  $m$  merupakan *mean*,  $n$  merupakan variabel (bisa tegangan atau daya sinyal) dengan  $\sigma^2$  merupakan varian dari  $n(t)$ . Karakteristik dari *White*



*Gaussian Noise* adalah nilai PSD yang sama untuk semua nilai frekuensi pada sistem komunikasi atau biasa disebut dengan terdistribusi *uniform* (seragam).

Setelah melewati kanal AWGN, maka bit informasi di penerima akan dibandingkan dengan bit informasi pada saat dikirimkan. Perhitungan mengenai besarnya nilai *Bit Error Probability* pada kanal AWGN untuk setiap modulasi seperti BPSK, QPSK, dan 16-QAM dapat dirumuskan sebagai berikut [14]:

$$P_b, BPSK = P_b, QPSK = 0.5 \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (2.26)$$

$$P_b, 16QAM = \frac{3}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_s}{10N_0}} \right) \quad (2.27)$$

### 2.9.2 Kanal Rayleigh Fading

Gangguan pada komunikasi *wireless*, seperti pantulan, difraksi, dan hamburan sangat mempengaruhi sinyal yang diterima. Akibat dari gangguan tersebut, penerima dapat menerima sinyal hasil superposisi dari beberapa sinyal yang berbeda fasa, waktu kedatangan serta daya sinyal yang diterima. Fenomena seperti ini yang biasa disebut dengan *multipath fading*.

*Multipath* adalah fenomena propagasi yang mengakibatkan sinyal radio sampai pada penerima dengan lebih dari satu macam pola. Hal ini disebabkan oleh adanya pantulan dan difraksi dari lapisan *ionosfer* dan *terrestrial* seperti gunung, pohon, dan bangunan. Sedangkan fading adalah fenomena dari fluktuatif amplitudo dan fase dari satu atau lebih sinyal yang diterima dan bersifat bisa menguatkan atau melemahkan sinyal. Fading disebabkan karena perubahan karakteristik jalur propagasi terhadap waktu. Pada komunikasi *wireless* dengan jalur *multipath*, model statistik yang sering digunakan adalah kanal fading *Rayleigh* dan fading rician. Pembahasan pada model kali ini lebih ke kanal fading *Rayleigh*.

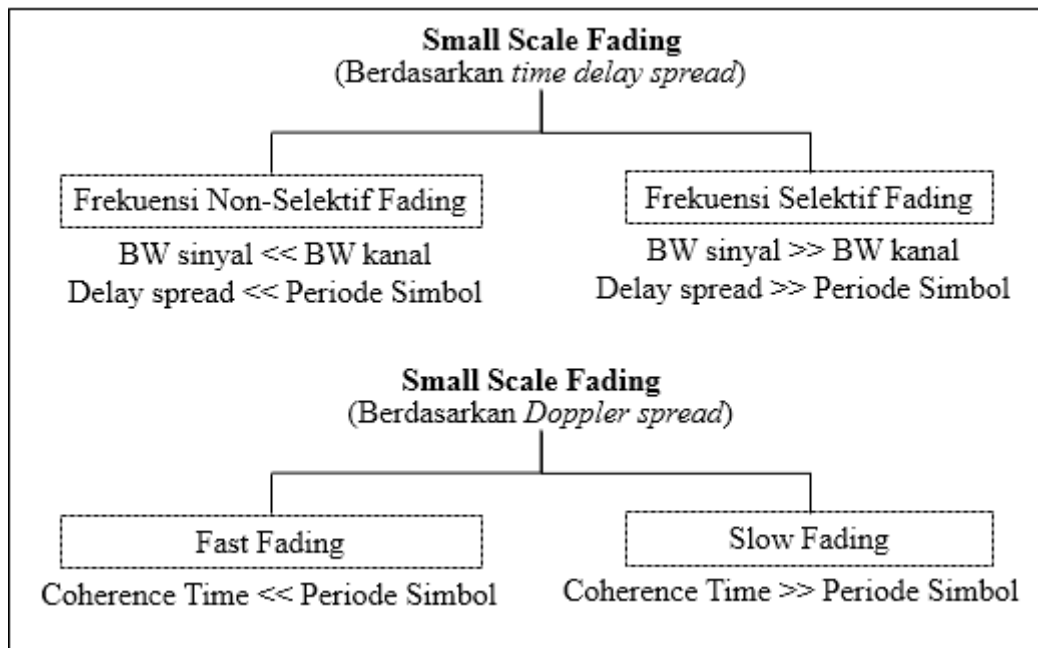
Distribusi *Rayleigh* yang digunakan dalam penelitian merupakan salah satu distribusi yang dapat menjadi model untuk mewakili fading, sehingga disebut fading *Rayleigh*. Pada fading *Rayleigh*, sinyal yang diterima pada penerima melalui

beberapa macam jalur yang berbeda namun memberikan energi yang sama terhadap sinyal gabungan yang ada pada penerima.

Menurut [3] telah diketahui bahwa *envelope* dari jumlah antara 2 sinyal *noise quadrature gaussian* memenuhi distribusi *Rayleigh*. Distribusi *Rayleigh* mempunyai fungsi kerapatan probabilitas seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut [12] :

$$f_R = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) & (0 \leq r \leq \infty) \\ 0 & (r \leq 0) \end{cases} \quad (2.28)$$

Di mana  $\sigma$  menyatakan tegangan rata-rata,  $\sigma^2$  menyatakan daya rata-rata,  $r$  menyatakan variabel acak. Fading Rayleigh terjadi dalam kondisi tidak ada *path* yang dominan atau *line of sight* (LOS). Sedangkan jika terdapat kondisi yang dominan maka dikatakan berdistribusi *Rician*.



Gambar 2.8 Karakteristik Kanal Rayleigh Fading

Sebagai tambahan, pada penelitian ini menggunakan kondisi kanal frekuensi selektif fading. Hubungan antara kondisi frekuensi selektif fading dan kanal Rayleigh dijelaskan sebagai berikut. Jika dilihat dari karakteristik kondisi

kanal Rayleigh dapat dibagi menjadi dua yaitu kanal frekuensi selektif fading dan kanal frekuensi non-selektif fading. Syarat suatu sistem mengalami frekuensi selektif fading adalah pertama ketika *bandwidth* dari sinyal jauh lebih besar dari *bandwidth* kanal, kedua *delay spread* jauh lebih besar daripada periode simbol. Sedangkan suatu sistem dapat dikatakan frekuensi non-selektif fading yaitu pertama ketika *bandwidth* dari kanal jauh lebih besar dari *bandwidth* sinyal, kedua periode simbol jauh lebih besar daripada *delay spread*. Kedua karakteristik tersebut diklasifikasikan masuk *small scale fading* berdasarkan *time delay spread*. Terdapat karakteristik lainnya jika ditinjau dari *Doppler spread* yaitu kanal Rayleigh dapat dikatakan *slow fading* atau *fast fading*. *Slow fading* terjadi ketika periode simbol jauh lebih besar daripada *coherence time*, sedangkan *fast fading* terjadi ketika *coherence time* jauh lebih besar daripada periode simbol. Kondisi dari penjelasan karakteristik kanal fading tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.8. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan kondisi kanal frekuensi selektif *slow* Rayleigh fading, artinya kondisi karakteristik dari kanal Rayleigh adalah frekuensi selektif dan *slow* fading karena memenuhi persyaratan yang sudah dijelaskan sebelumnya.

Selanjutnya, setelah melewati kanal *multipath fading* dan noise AWGN, maka kesalahan bit informasi di penerima akan dibandingkan dengan bit informasi pada saat dikirimkan atau menghitung nilai BER. Perhitungan besarnya nilai *Bit Error Probability* pada kanal Rayleigh Fading untuk setiap modulasi adaptif yang digunakan seperti BPSK, QPSK, dan 16-QAM dapat dirumuskan sebagai berikut [14]:

$$P_b, BPSK = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{E_b / N_0}{E_b / N_0 + 1}} \right) \quad (2.29)$$

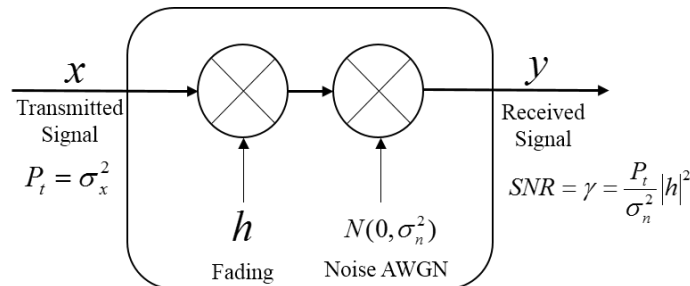
$$P_b, QPSK = 1 - \left( \sqrt{\frac{E_b / N_0}{E_b / N_0 + 1}} \right) \quad (2.30)$$

$$P_b, 16QAM = \frac{3}{8} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{5}{2E_b / N_0}}} \right) \quad (2.31)$$

## 2.10 Kapasitas Kanal

Kapasitas kanal transmisi adalah suatu kapasitas atau ukuran suatu data yang dapat dikirimkan melalui media transmisi. Banyaknya informasi yang bisa dilewatkan dalam suatu kanal frekuensi, dinyatakan dalam satuan bit per second Hertz (bps/Hz). Pada kondisi *real*, kapasitas kanal meningkat secara logaritmis dengan *signal to noise ratio* (SNR). Jika daya pancar dari *transmitter* semakin besar maka kapasitas kanal sistem juga semakin besar karena nilai SNR yang tinggi.

Pada Gambar 2.9 merupakan blok sistem untuk mengetahui kapasitas kanal SISO (*Signal Input Signal Output*) dengan kondisi kanal fading. Daya transmisi dinotasikan dengan  $P_t$ ,  $\frac{P_t}{\sigma_n^2} |h|^2$  adalah SNR pada daya terima, dan  $\sigma_n^2$  merupakan daya noise pada kanal. Sedangkan koefisien fading yang dinotasikan sebagai  $h$  adalah *random variable* maka kapasitas kanal sistem yang dirumuskan seperti penjelasan berikutnya juga merupakan *random variable*.



Gambar 2.9 Kapasitas Kanal SISO dengan CSI sempurna [27]

Hubungan *slow flat fading* pada kanal AWGN bisa diekspresikan dengan hubungan *input-output* sebagai berikut :

$$y = hx + \eta \quad (2.32)$$

Di mana,  $y$  merupakan output dari kanal,  $\eta$  merupakan *Gaussian process* dengan *zero mean*,  $h$  merupakan *Gaussian random variable* dengan *Rayleigh* atau *Rician* PDF dan diasumsikan  $h$  adalah proses ergodik artinya semua fungsi memiliki nilai *time average* sama dengan nilai *assamble average*. Sehingga kapasitas dari kanal fading merupakan kapasitas ergodik yang dirumuskan sebagai berikut [27]:

$$C_{Rayleigh} = \log_2 (1 + |h|^2 SNR) = \log_2 e \cdot \exp\left(\frac{1}{SNR}\right) \cdot \exp \int \left(\frac{1}{SNR}\right) \quad (2.33)$$

Sedangkan, pada kanal AWGN tidak terdapat koefisien fading maka pada hubungan *input-output*  $h = 1$  dan kapasitas kanal sistem untuk kanal AWGN bisa dirumuskan sebagai berikut [27] :

$$C_{AWGN} = \log_2 (1 + SNR) = \log_2 \left(1 + \frac{E_s}{N_o}\right) \quad (2.34)$$

Kapasitas kanal *Rayleigh* selalu memiliki nilai yang lebih rendah dari kanal AWGN karena jika diasumsikan nilai ekspektasi  $E[\cdot]$  adalah *random variable* dari  $h$  maka [27],  $E[h]^2 = 1$  dan  $E[f(X)] \leq f(E[X])$ .

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Pendahuluan

Pada bagian ini membahas beberapa sub pokok bahasan antara lain diagram *fish bone* penelitian, blok diagram dari sistem OFDM pada modulasi adaptif, parameter-parameter simulasi sistem, skenario uji simulasi dengan variasi frekuensi Doppler normalisasi, serta verifikasi sistem yang diusulkan dan dibandingkan dengan teori yang sudah ada. Kanal yang digunakan pada simulasi ini adalah kanal AWGN dan frekuensi selektif Rayleigh fading.

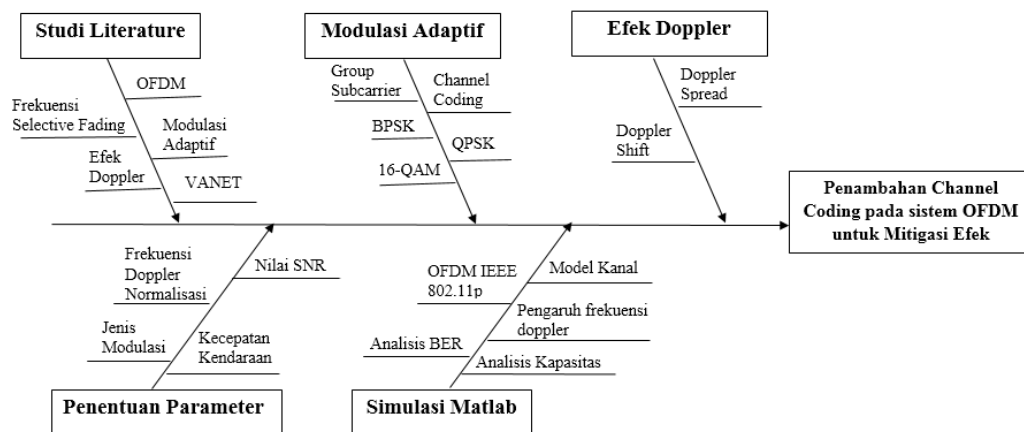
Implementasi modulasi adaptif yang diusulkan pada penelitian ini dipilih berdasarkan dari nilai gain kanal pada saat itu. Selanjutnya nilai gain kanal tersebut digunakan untuk memilih modulasi mana yang akan digunakan. Ada tiga jenis modulasi yang digunakan pada modulasi adaptif ini yaitu modulasi BPSK, QPSK, dan 16-QAM. Berbeda dengan modulasi adaptif pada umumnya yang mengirimkan informasi datanya secara serial untuk semua subcarrier, pada modulasi adaptif yang diusulkan ini informasi data dikirimkan berdasarkan informasi dari tiap subcarrier.

Asumsi untuk kondisi kanal pada sistem OFDM ini yaitu perfect CSI (*Channel State Information*), di mana pengirim dan penerima mengetahui informasi bit yang akan dikirim dan diterima. Kondisi lingkungan yang disimulasikan pada MATLAB untuk penelitian ini yaitu berdasarkan kondisi lingkungan VANET yang mana memiliki frekuensi carrier 5.9 Ghz dan menggunakan 6 lintasan *multipath* berdasarkan ITU-Vehicular.

Pengujian skenario dalam simulasi ini menerapkan tiga frekuensi Doppler normalisasi untuk melihat kinerja dari modulasi adaptif. Selain itu, analisis mengenai kapasitas sistem juga dibahas untuk melihat sejauh mana kemampuan adaptif dari sistem tersebut dalam hal alokasi penggunaan modulasi BPSK, QPSK, dan 16-QAM. Manfaat jika menggunakan modulasi adaptif yaitu ketika kondisi kanal memburuk sistem bisa langsung *switch* ke modulasi dengan tingkat kesalahan yang rendah dan jika kondisi kanal baik bisa *switch* ke modulasi dengan orde tinggi agar dapat mentransmisikan bit informasi lebih banyak sehingga bisa lebih efisien.

### 3.2 Diagram *Fishbone* Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan serangkaian kegiatan mulai dari *study* literatur, pemilihan jenis modulasi, penentuan jenis kanal yang digunakan, skenario simulasi pengukuran, penetapan parameter pengukuran hingga analisa hasil simulasi. Sehingga hasil akhir yang akan dicapai adalah mendapatkan kinerja modulasi adaptif optimal dengan tmbahan channel coding untuk memitigasi efek Doppler.



Gambar 3.1 Diagram *Fishbone* Penelitian

Pada tahapan *study* literatur dipelajari tentang sistem OFDM, sistem VANET, pengaruh efek Doppler, implementasi modulasi adaptif yang diusulkan pada penelitian serta penggunaan kanal untuk frekuensi selektif fading, kemudian uji kinerja sistem dan analisis data menggunakan software matlab. Adapun sumber-sumber yang dipergunakan adalah berasal dari buku teks serta paper-paper penelitian terkait yang sudah dilakukan sebelumnya.

Uji simulasi pada penelitian disesuaikan dengan frekuensi kerja VANET yaitu 5.9 Ghz sesuai dengan standart IEEE 802.11p. Selain itu, kecepatan kendaraan yang digunakan yaitu 1m/s , 10m/s, dan 100m/s yang mana sesuai dengan frekuensi Doppler normalisasi 0.000128, 0.00128, 0.0128. Uji sistem lingkungan VANET yang diaplikasikan pada penelitian ini yaitu secara *mobile to fix* di mana salah satu node bergerak dan node yang lainnya diam. Parameter uji sistem yang dianalisis adalah kinerja dari nilai BER yang didapatkan dan kapasitas sistem pada modulasi adaptif yang diusulkan selanjutnya dibandingkan dengan modulasi non-adaptif.



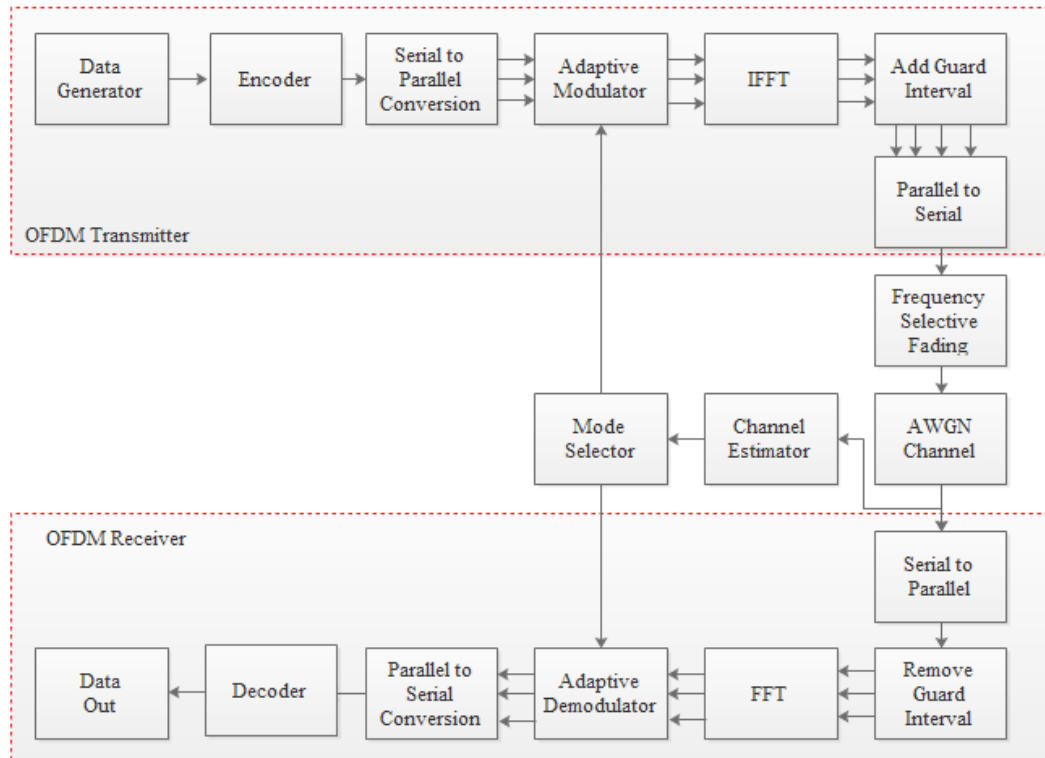
### 3.3 Diagram Blok Penelitian

Secara garis besar penelitian ini dapat digambarkan melalui diagram alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2 yaitu mengenai sistem OFDM pada pengirim dan penerima yang diimplementasikan dengan modulasi adaptif. Pada bagian pengirim atau *transmitter* ada beberapa blok yaitu pertama terdapat data generator di mana bit-bit dibangkitkan yang bernilai 0 dan 1, selanjutnya ada blok *encoder* berguna untuk mengkodekan bit informasi untuk meminimalisasi terjadinya error di penerima. Jadi bit informasi dibagi ke dalam beberapa blok kemudian ditambahkan *bit parity* di setiap blok yang akan dikirimkan. Setelah melewati encoder, ada blok *serial to parallel conversion* yang digunakan untuk mengkonversi bit informasi secara serial menjadi paralel.

Blok *adaptive modulator* berfungsi sebagai penyedia dari pilihan modulasi yang akan digunakan untuk mengirimkan data. Setelah melalui *mode selector* yang berperan sebagai penentu bit informasi yang dibangkitkan akan ditransmisikan dengan modulasi BPSK, QPSK, atau pun 16-QAM, maka blok *adaptive modulator* sebagai eksekutor berperan mengeksekusi pilihan dari *mode selector* untuk pilihan modulasi yang digunakan. Pemilihan modulasi dipilih berdasarkan dari informasi kanal yang diberikan ke pengirim. Selanjutnya, blok IFFT yang ada di bagian *transmitter* berfungsi untuk mengubah data dari domain frekuensi ke domain waktu. Sebelum data dikirim, penambahan *cyclic prefix* atau *guard interval* pada bit informasi yang dikirim berguna untuk menentukan simbol pertama pada bit informasi yang dikirimkan agar tidak salah dalam mengestimasi data. Blok *parallel to serial conversion* digunakan sebelum data melewati kanal. Jadi, data yang dikirimkan ke kanal berbentuk serial.

Pengaruh frekuensi selektif fading ditambahkan pada kanal untuk melihat ketahanan kinerja dari sistem yang diusulkan serta gangguan noise AWGN ditambahkan tepat setelah melewati kanal karena pada saat itu kondisi sinyal dalam keadaan lemah. Selain itu, terdapat gangguan efek Doppler yang terjadi pada sistem OFDM karena pengaruh kondisi kanal yang mobile. Sehingga, modulasi adaptif dipilih dengan tujuan karena sifatnya yang fleksibel sehingga dapat menyesuaikan dengan kondisi kanal yang sering berubah-ubah akibat lingkungan VANET yang

dinamis. Oleh karena itu, modulasi adaptif diharapkan mampu mengatasi masalah tersebut dan meningkatkan kinerja dari sistem.



Gambar 3.2 Diagram Blok OFDM pada Modulasi Adaptif dengan Kanal Frekuensi Selektif Fading

Blok sistem pada bagian penerima memiliki proses yang berkebalikan dari blok pengirim. Setelah melewati kanal, maka data informasi dikembalikan lagi menjadi bentuk parallel. Guard interval yang sudah ditambahkan pada blok pengirim juga dihilangkan untuk mengestimasi simbol pertamanya. Blok FFT adalah kebalikan dari blok IFFT di mana data dari domain waktu diubah ke dalam domain frekuensi. Selanjutnya masuk ke dalam blok adaptive demodulator yang digunakan untuk mengubah bit informasi menjadi 1 0 kembali yang didapatkan dari informasi mode selector untuk menentukan bit informasinya akan didemodulasi menggunakan BPSK, QPSK, atau pun 16-QAM. Bit informasi dikembalikan lagi menjadi bentuk serial dan selanjutnya decoder digunakan untuk menghilangkan coding yang sudah diberikan pada blok encoder. Sehingga bit informasi sudah tidak berbentuk blok-blok lagi. Jadi nilai bit error rate sudah bisa didapatkan dari situ.

### 3.4 Parameter Simulasi Sistem Modulasi Adaptif pada OFDM

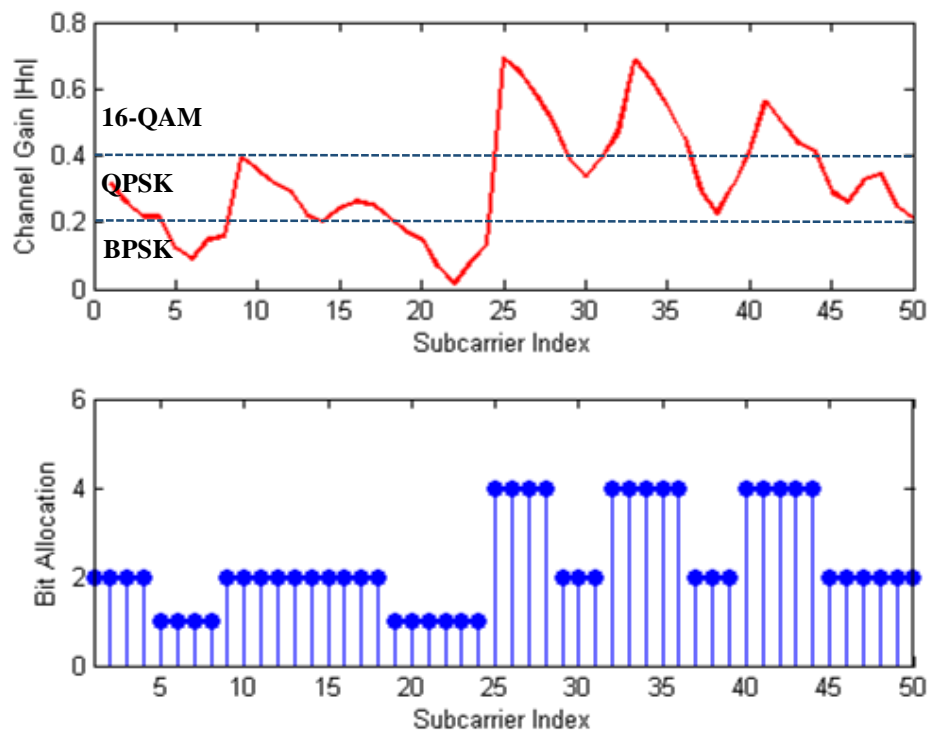
Penentuan parameter dalam implementasi modulasi adaptif pada sistem OFDM dapat dilakukan terlebih dahulu untuk menentukan hasil yang optimal dalam simulasi sistem. Dua parameter yang menjadi fokus penelitian ini yaitu mengenai kinerja BER dan peningkatan kapasitas sistem dalam hal penggunaan modulasi adaptif dengan kondisi kanal frekuensi selektif fading dan pengaruh efek Doppler. Kondisi yang akan diujikan dalam simulasi penelitian ini adalah variasi *threshold* dan frekuensi Doppler normalisasi. Pada Tabel 3.1. menunjukkan parameter-parameter simulasi sistem yang digunakan dalam pengambilan dan analisis data untuk semua kondisi yang akan diujikan.

Tabel 3.1 Parameter Simulasi Sistem

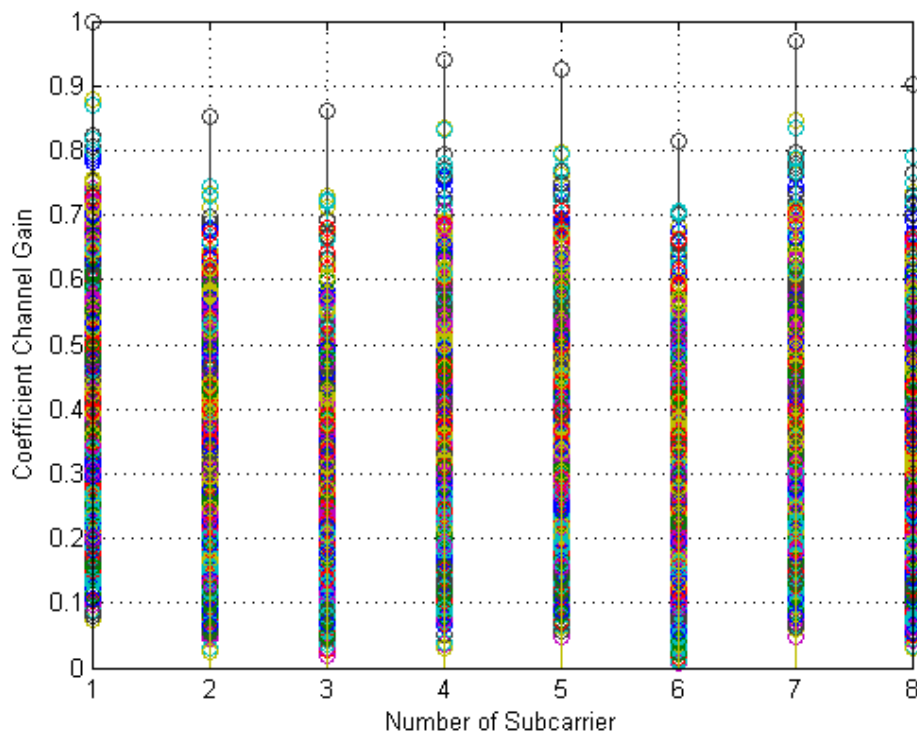
Parameter	Nilai
Jumlah bit yang dibangkitkan	100,000
Jumlah subcarrier	8
Frekuensi Doppler Normalisasi	0.000128, 0.00128, 0.0128
Modulasi	BPSK, QPSK, 16-QAM
SNR Range	0-50 dB
<i>Threshold</i>	0.2 & 0.4, 0.3 & 0.5, 0.5&0.7
Channel	Frekuensi Selektif Fading
Noise	AWGN

### 3.5 Algoritma Modulasi Adaptif

Modulasi adaptif yang digunakan pada penelitian ini menggunakan skema adaptif berdasarkan nilai gain kanal. Gain kanal pada lingkungan VANET bersifat dinamis artinya mudah berubah di setiap subcarrier dengan nilai maksimumnya adalah 1 karena sudah dinormalisasi. Pada Gambar 3.3 menunjukkan nilai gain kanal dari setiap subcarrier yang dibangkitkan. *Threshold* yang digunakan pada simulasi adalah 0.2 dan 0.4. Penjelasan mengenai gambar tersebut memberikan ilustrasi dari 50 subcarrier yang dibangkitkan dan selanjutnya akan diubah ke dalam alokasi bit yang sudah ditentukan saat sinyal dimodulasi berdasarkan *Bit Allocation Table* yang direpresentasikan sebagai berikut {0(NoTx), 1(BPSK), 2(QPSK), 4(16-QAM)}. Hal itu guna mendapatkan skema adaptif yang diinginkan sehingga bertujuan untuk memitigasi *deep fading* pada sistem OFDM dengan pengaruh efek Doppler pada kanal frekuensi selektif fading.



Gambar 3.3 Representasi Gain Kanal ke dalam Alokasi Bit pada Tiap Subcarrier



Gambar 3.4 Koefisien Gain Kanal di Setiap Subcarrier

Selanjutnya, penjelasan mengenai skema modulasi adaptif akan dijelaskan sebagai berikut. Algoritma dari skema modulasi yang diusulkan dipilih berdasarkan nilai gain kanal yang didapatkan melalui CSI (*Channel State Information*). Bagian pemancar dapat menentukan teknik modulasi yang tepat untuk digunakan dengan efisiensi daya terbaik. Sehingga tetap memenuhi kriteria kinerja *bit error rate* yang diinginkan. Penjelasan lebih lengkap mengenai proses adaptif yang digunakan akan diuraikan ke dalam beberapa point singkat sebagai berikut :

1. Setiap subcarrier terdiri dari variasi gain kanal yang didapatkan pada kondisi kanal pada saat itu yang disimbolkan dengan  $\gamma$ .
2. Bandingkan nilai gain kanal dengan level *threshold* yang sudah ditentukan untuk setiap teknik modulasi yang digunakan. *Threshold* ditentukan berdasarkan nilai CCDF yang dihitung dari kondisi kanal pada saat itu.
3. Jika nilai gain kanal lebih rendah dari level *threshold* yang ditentukan maka modulasi orde lebih rendah yang digunakan. Sedangkan, ketika nilai gain kanal lebih tinggi dari level *threshold* yang ditentukan maka modulasi orde lebih tinggi yang ditransmisikan. Skenario pembagian daerah untuk setiap *threshold* dapat dilihat seperti pada
4. Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Skenario Pembagian Daerah Modulasi Adaptif Berdasarkan Gain Kanal

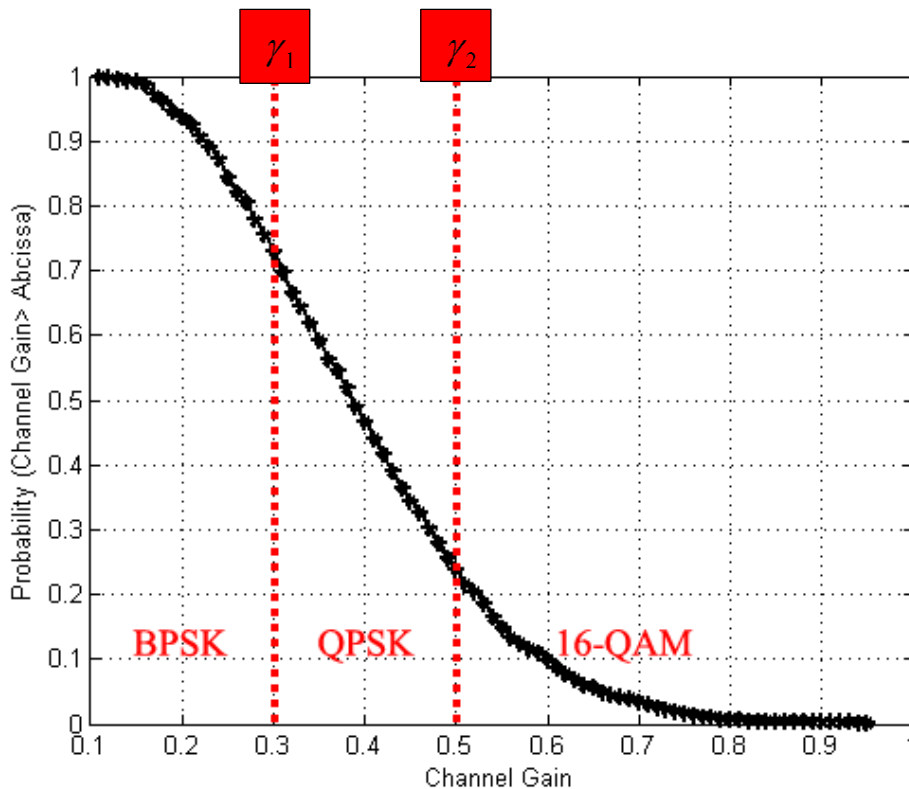
<b>Threshold</b>	<b>Region</b>	<b>Interval Gain Kanal</b>	<b>Modulasi</b>
$\gamma_1 \& \gamma_2$	Region 1	$\gamma_{BPSK} \leq \gamma_1$	BPSK
	Region 2	$\gamma_1 \leq \gamma_{QPSK} \leq \gamma_2$	QPSK
	Region 3	$\gamma_2 \leq \gamma_{16-QAM}$	16-QAM

di mana  $\gamma_1$  dan  $\gamma_2$  merupakan batas dari nilai gain kanal bagian bawah dan atas, sedangkan  $\gamma_{BPSK}$  adalah *threshold* bawah yang merupakan daerah modulasi BPSK,  $\gamma_{QPSK}$  yaitu *threshold* kedua yang berada ditengah dan merupakan bagian dari daerah modulasi QPSK, serta  $\gamma_{16-QAM}$  adalah *threshold* atas yang merupakan bagian dari daerah modulasi 16-QAM.

Sementara, penentuan *threshold* yang diujikan pada sistem OFDM dengan modulasi adaptif yang diimplementasikan *channel coding* akan dibahas pada sub bab selanjutnya.

### 3.6 Penentuan *Threshold*

Pada penelitian ini dilakukan pengujian modulasi adaptif dengan variasi *threshold* dari nilai gain kanal. Penentuan *threshold* berdasarkan peluang dari kurva CCDF gain kanal dari sistem OFDM tersebut. Nilai gain kanal yang digunakan sudah dinormalisasi sehingga nilai maksimumnya sama dengan 1. Sebagai contoh, penentuan *threshold* dengan  $f_d = 0.000128$  untuk salah satu *threshold* yang akan diujikan seperti pada Gambar 3.5. Ada tiga modulasi yang diimplementasikan dalam modulasi adaptif ini sehingga dibagi menjadi tiga daerah modulasi. Level *threshold* yang digunakan pada Gambar 3.5 yaitu 0.3 dan 0.5 itu artinya modulasi BPSK akan digunakan ketika nilai gain kanal kurang dari sama dengan 0.3, sedangkan *switch mode* untuk modulasi QPSK digunakan pada saat gain kanal antara 0.3 dan 0.5, terakhir modulasi 16-QAM digunakan ketika gain kanal sistem OFDM lebih dari 0.5.



Gambar 3.5 Penentuan *Threshold* Berdasarkan Grafik CCDF Gain Kanal

Selanjutnya, bit informasi yang dikirim melalui pengirim pun menyesuaikan dengan informasi dari gain kanal tersebut. Modulasi BPSK mengirim 1 bit informasi, modulasi QPSK mengirim 2 bit informasi, dan modulasi 16-QAM mengirim 4 bit informasi. Kemungkinan terjadi kesalahan bit informasi bisa diminimalisir dengan cara ketika kondisi kanal buruk sehingga nilai gain kanal rendah atau nilai SNR rendah, maka pengirim dapat mengirimkan bit informasi dengan modulasi BPSK. Pengiriman modulasi BPSK ini tentunya tidak membutuhkan daya yang tinggi. Sedangkan, jika kondisi kanal baik atau nilai SNR tinggi, maka pengirim bisa mengirimkan bit informasi dengan modulasi 16-QAM dengan tujuan agar bit informasi yang terkirim bisa lebih banyak dan cepat sampai di penerima. Sehingga, otomatis hasilnya lebih efisien dan dapat meningkatkan kapasitas kanal. Hal itu merupakan salah satu keunggulan modulasi adaptif pada sistem OFDM dengan kondisi kanal frekuensi selektif fading dengan pengaruh efek Doppler yang dapat menyebabkan pergeseran frekuensi dalam penelitian ini.

Sementara, dalam sistem yang diusulkan terdapat tiga variasi *threshold* yang diujikan pada modulasi adaptif dengan implementasi *channel coding*. Penggunaan skenario variasi *threshold* tersebut bertujuan untuk melihat pengaruh *threshold* terhadap kapasitas kanal serta kinerja *bit error rate* yang digunakan pada modulasi adaptif. Sedangkan, penentuan *threshold* untuk pembagian tiga daerah modulasi yang digunakan seperti modulasi BPSK, QPSK, dan 16-QAM dapat direpresentasikan secara matematis seperti pada Tabel 3.2.

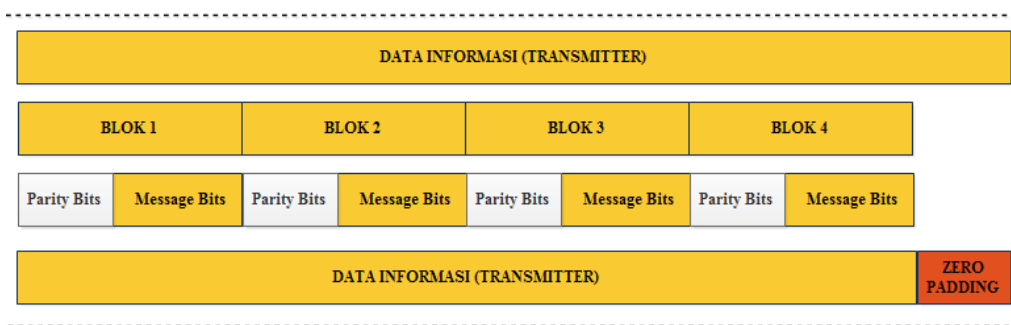
Maka, nilai gain kanal yang diusulkan sebagai batas atas atau bawah untuk parameter *threshold* pada simulasi dapat dilihat seperti pada Tabel 3.3. Ada tiga *threshold* yang diujikan pada simulasi sistem OFDM dengan modulasi adaptif yaitu yang pertama dinamakan dengan adaptif 1 dengan nilai gain kanal yang digunakan sebagai batas bawah 0.2 dan batas atas 0.4, yang kedua yaitu dinamakan adaptif 2 dengan nilai gain kanal yang digunakan sebagai batas bawah 0.3 dan batas atas 0.5, yang ketiga dinamakan dengan adaptif 3 dengan nilai gain kanal yang digunakan sebagai batas bawah 0.5 dan batas atas 0.7. Ketiga nilai *threshold* tersebut didapatkan dari melihat grafik CCDF dengan variasi frekuensi Doppler normalisasi seperti pada Gambar 4.10.

Tabel 3.3 Parameter *Threshold* Modulasi Adaptif untuk Simulasi

<b><i>Threshold</i></b>	$\gamma_1$	$\gamma_2$
Adaptif 1	0.2	0.4
Adaptif 2	0.3	0.5
Adaptif	0.5	0.7

### 3.7 Implementasi *Channel Coding* pada Modulasi Adaptif

Implementasi *Channel coding* pada modulasi adaptif digunakan sebagai sistem *error control* untuk mendeteksi dan mengoreksi *error* tanpa harus meminta pengirim mengirimkan data ulang. Cara yang dilakukan yaitu dengan menambahkan bit-bit redundant (*parity bits*) pada bit informasinya ketika data informasi akan dikirimkan melalui *transmitter* seperti yang diilustrasikan pada blok diagram Gambar 3.6. Pada awalnya, data informasi yang berbentuk serial dibagi menjadi beberapa blok. Satu blok terdiri dari data informasi dan *parity bits*. *Channel coding* yang diaplikasikan menggunakan kode *Hamming* (7,4) yang mana satu blok terdiri dari 4 bit data informasi dan 3 bit redundansi sehingga panjang *codeword* sebesar 7 bit. Satu blok kode *Hamming* berisi : i1, i2, i3, i4, r1, r2, r3 (i merupakan data bits, r merupakan *parity bits*). Oleh karena itu, sistem ini memiliki *data rate* sebesar  $4/7 \approx 0.571$  dan bisa mendeteksi, mengoreksi *single bit error* (SEC).



Gambar 3.6 Proses Implementasi *Channel Coding* pada *Encoder* di *Transmitter*

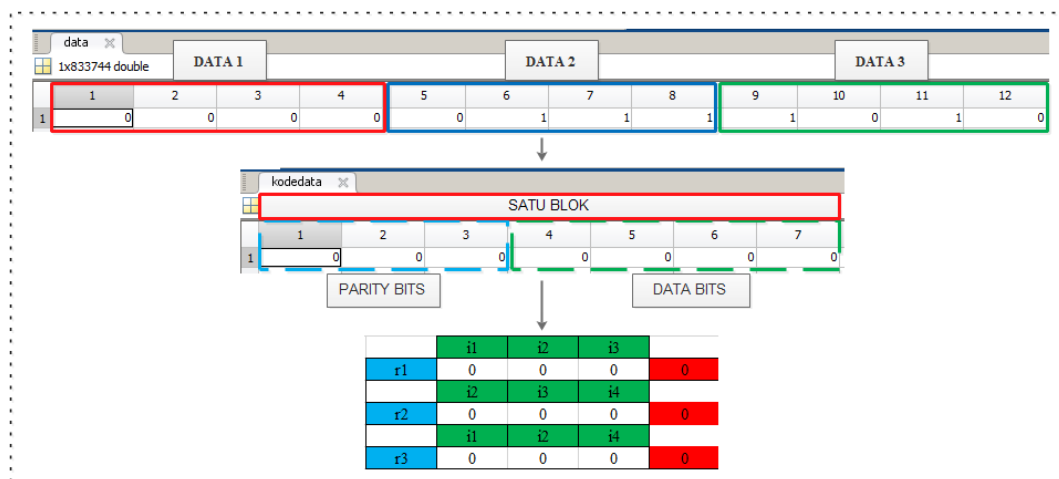
*Hamming code* yang di dalamnya terdapat satu baris *parity bits* bisa dibentuk polanya dengan cara sebagai berikut :

- $r1 = i1 \text{ XOR } i2 \text{ XOR } i3$
- $r2 = i2 \text{ XOR } i3 \text{ XOR } i4$



- $r3 = i1 \text{ XOR } i2 \text{ XOR } i4$

Jika melihat simulasi MATLAB mengenai *channel coding* pada modulasi adaptif, maka pola *parity bits* yang sudah dijelaskan sebelumnya bisa dilihat hasilnya pada Gambar 3.7. Pada gambar tersebut rumus XOR dari gabungan bit sudah menunjukkan hasil yang sesuai ketika data dikodekan dan ditambahkan dengan *parity bits*, artinya pada saat satu blok ditransmisikan belum terdeteksi kesalahan bit pada data informasi maupun bit redundansinya. Jadi, pada blok-blok selanjutnya berlaku cara yang sama untuk mengkodekan data informasi yang dikirim.

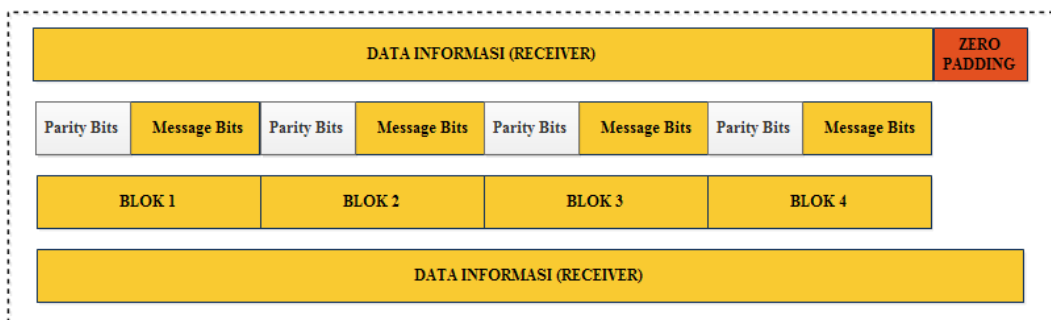


Gambar 3.7 Hasil Simulasi MATLAB Pola Satu Blok Data OFDM dengan *Channel Coding* pada Proses *Encoding*

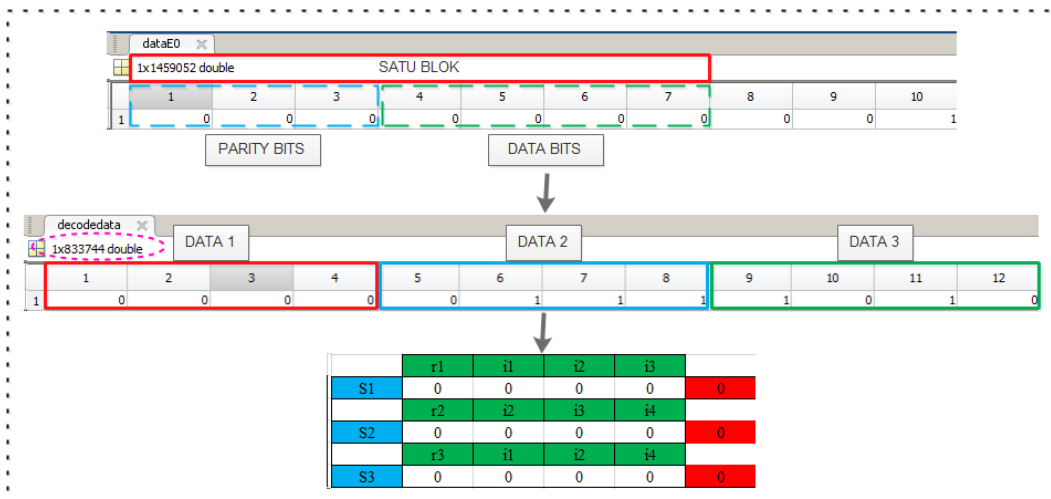
Proses kebalikan dari *encoding* (7,4) dinamakan sebagai *decoding* (7,4). Blok sistem dari *decoding* yang ada di *receiver* diilustrasikan pada Gambar 3.8. Awalnya blok sistem yang sampai di penerima akan menghilangkan dulu *zero padding* yang sudah ditambahkan agar sistem dapat membaca dengan jelas bit-bit yang sudah dikodekan. *Zero padding* yang ditambahkan tadi bertujuan untuk menambahkan panjang blok sistem agar sesuai dengan data sistem ketika bit data tidak dikodekan. Jadi, kedua sistem nantinya dapat dibandingkan kinerjanya antara sistem dengan implementasi *channel coding* dan sistem tanpa *channel coding*. Selanjutnya data dapat dideteksi karena bentuknya yang sudah kembali menjadi beberapa blok sistem.

Selain itu, pada sistem *decoder* yang ada di penerima, bentuk dari kesalahan bit yang sudah dikodekan dinamakan *error syndrome* yang bisa diidentifikasi dengan melihat pola bit yang diterima di *decoder* dan dinotasikan dengan gabungan bit XOR sebagai berikut :

- $S1 = r1 \text{ XOR } i1 \text{ XOR } i2 \text{ XOR } i3$
- $S2 = r2 \text{ XOR } i2 \text{ XOR } i3 \text{ XOR } i4$
- $S3 = r3 \text{ XOR } i1 \text{ XOR } i2 \text{ XOR } i4$



Gambar 3.8 Proses Implementasi Channel Coding pada Decoder di Receiver



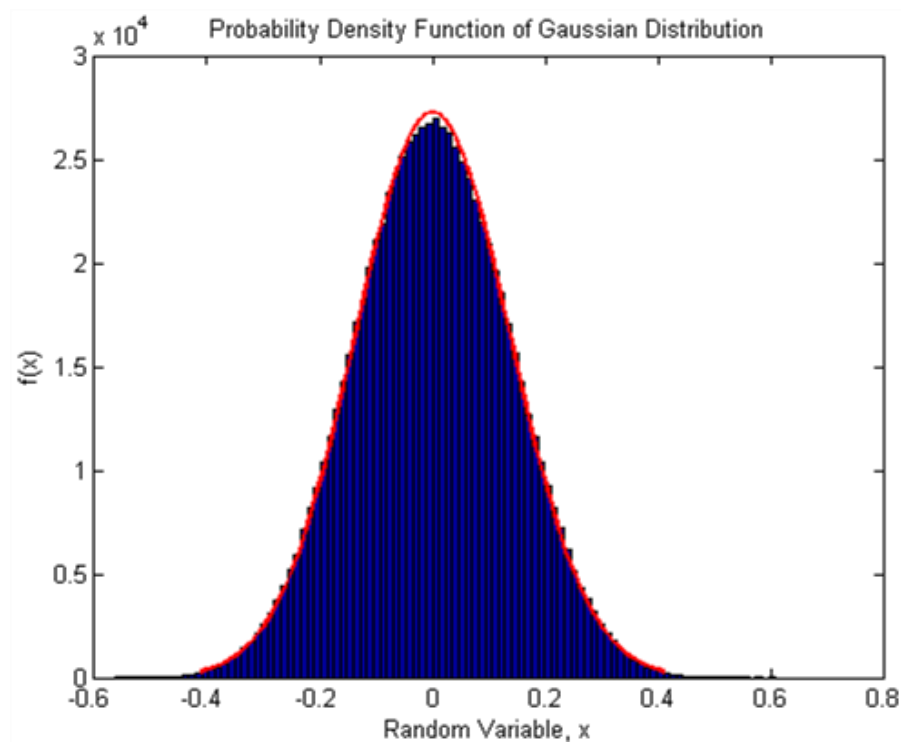
Gambar 3.9 Hasil Simulasi MATLAB Pola Satu Blok Data OFDM dengan *Channel Coding* pada Proses *Decoding*

Jika melihat hasil simulasi MATLAB mengenai proses *decoding* bisa dilihat hasilnya pada Gambar 3.9. Pada gambar tersebut *error syndrome* bisa dideteksi ketika bit data atau pun parity bits yang dikodekan hasilnya berbeda dengan yang ada di penerima. Ketika ada perbedaan bit, kode *Hamming* dapat mengoreksinya.

Pada kasus ini, blok pertama yang ditransmisikan setelah sampai di penerima menghasilkan bit-bit yang sama semua mulai dari *parity bits* sampai dengan *message bit*. Jika melihat pada satu blok data yang ada di pengirim berisi [0 0 0 0 0 0] dan setelah sampai di penerima bit data berisi [0 0 0 0 0 0]. Selain itu, jumlah matriks yang ada di penerima jumlah bitnya sudah sama dengan jumlah bit ketika data ada di pengirim yaitu sebesar 833.744 bit, artinya semua data yang dikodekan pada proses *encoding* dapat diterima dengan baik pada proses *decoding* yang ada di penerima. Sehingga, blok-blok selanjutnya pun mendapatkan cara deteksi *error syndrome* yang sama pada *decoder*.

### 3.8 Probability Density Function AWGN

Pada penelitian yang diusulkan, langkah pertama yang digunakan dalam memverifikasi sistem yang diusulkan adalah dengan melihat *probability density function* (pdf) dari kanal ideal (tanpa pengaruh fading) yang dirumuskan seperti pada persamaan (2.25). Sedangkan, pengganggu yang selalu ada pada komunikasi nirkabel adalah noise AWGN. Sehingga, hasil pdf dari noise AWGN secara simulasi terdistribusi Gaussian seperti yang terlihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 pdf dari Distribusi Gaussian noise AWGN

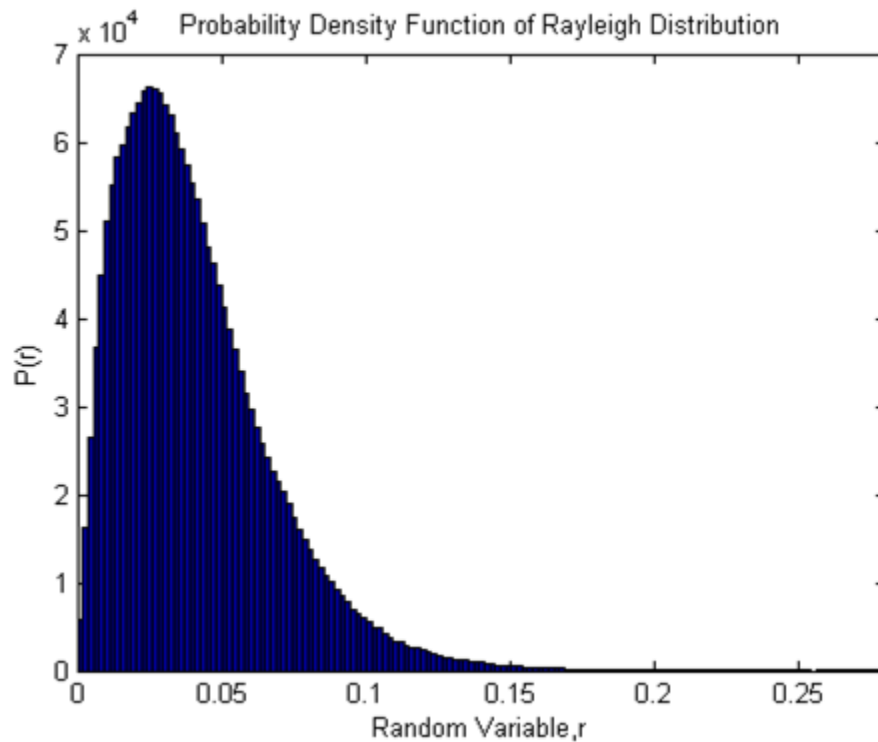
### 3.9 Probability Density Function Kanal Rayleigh Fading

Pada penelitian yang diusulkan selanjutnya yaitu menggunakan kanal Rayleigh fading, cara yang digunakan dalam memverifikasi sistem masih tetap sama yaitu dengan melihat *probability density function* (pdf) dari kanal seperti yang dirumuskan pada persamaan (2.28). Pada kanal Rayleigh pengganggu yang ada pada sistem berasal dari fading dan noise AWGN. Kondisi kanal Rayleigh digunakan untuk mensimulasikan *multipath* fading karena tidak ada lintasan dominan. Karakteristik dari kanalnya yaitu frekuensi selektif dan *slow* fading sehingga hasil dari pdf kanal harus terdistribusi secara Rayleigh. Jika dilihat melalui perhitungan secara matematis pada karakteristik kanal melalui parameter OFDM VANET yang diambil dari standart IEEE 802.11p, maka dapat dijelaskan sebagai berikut :

$D_s = \frac{vf}{c} = \frac{1 \times 5,9 \times 10^9}{3 \times 10^8} = 19,6 \text{ Hz}$	$B_s = 156,25 \text{ kHz}$
$T_c = \frac{1}{19,6} = 51 \text{ ms}$	$\tau_{RMS} = 400 \text{ ns}$
$T_s = 0,008 \text{ ms}$	$B_c = \frac{1}{50(400 \times 10^{-9})} = 50 \text{ kHz}$
$T_c \gg T_s$	$B_s \gg B_c$
$(Slow \text{ fading})$	$(\text{frekuensi selektif fading})$

Di mana  $D_s$  merupakan *Doppler spread*,  $T_c$  adalah *time coherence*,  $T_s$  yaitu *time signal* atau periode simbol, sedangkan  $B_s$  merupakan *bandwidth signal*,  $B_c$  adalah *bandwidth coherence*.

Sedangkan pada simulasi ini menunjukkan bahwa sistem kanal frekuensi selektif-Rayleigh fading yang digunakan hasilnya terdistribusi secara Rayleigh seperti yang terlihat pada Gambar 3.11. Sehingga, kanal ideal pada sub bab 3.8 dan kanal Rayleigh ini dapat digunakan sebagai landasan untuk melakukan penelitian dalam hal uji kinerja sistem OFDM pada modulasi adaptif dengan *channel coding* karena hasil dari distribusinya sudah sesuai dengan teori yang ada.



Gambar 3.11 pdf dari Distribusi Rayleigh Kanal Frekuensi Selektif Fading

### 3.10 Verifikasi Simulasi Sistem Model Kanal AWGN

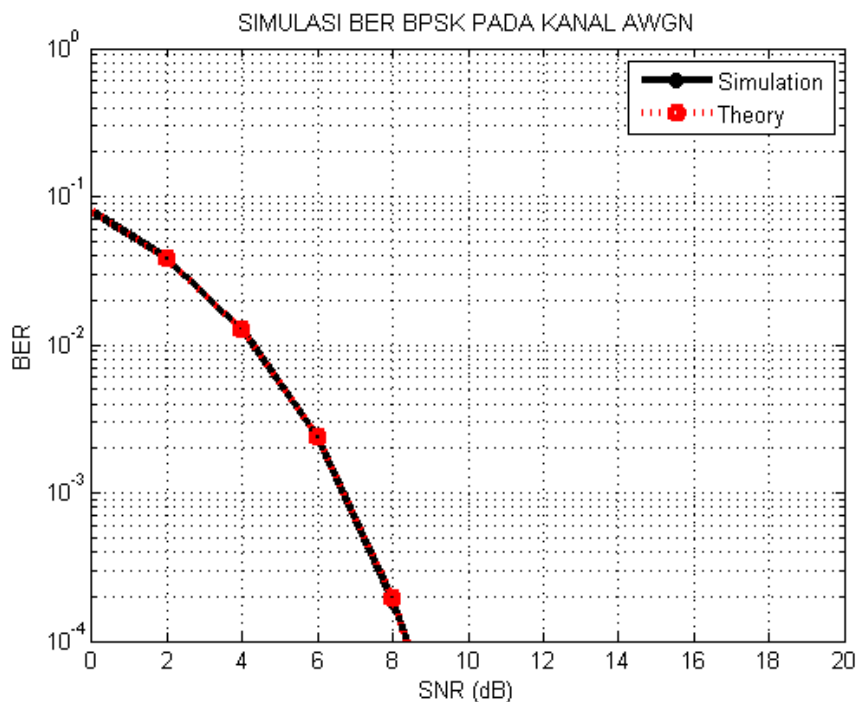
Verifikasi simulasi sistem bertujuan untuk melihat keakuratan suatu sistem jika diimplementasikan dengan model kanal yang dipilih. Model kanal yang digunakan pertama adalah kanal AWGN. Pada kanal AWGN, sinyal yang ditransmisikan hanya diberikan gangguan *white noise* yang tidak berkorelasi satu sama lain dan amplitudonya bersifat konstan. Oleh karena itu, sistem yang diusulkan akan diverifikasi terlebih dulu dengan teori yang ada dari setiap modulasi yang digunakan. Jadi, perbandingan antara hasil simulasi dan teori tersebut yang digunakan sebagai parameter verifikasi sistem dari model kanal AWGN.

#### 3.10.1 BPSK Kanal AWGN

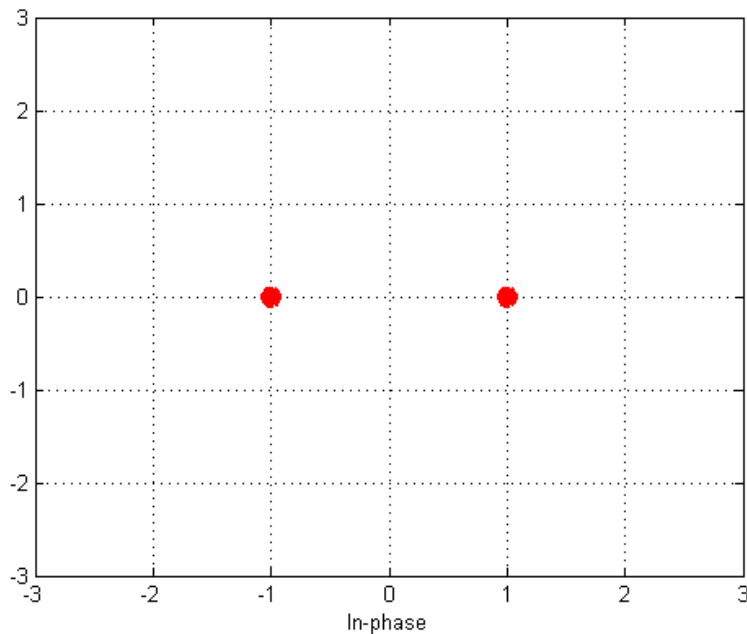
Modulasi pertama yang digunakan adalah modulasi BPSK. Model sistem yang diusulkan akan disimulasikan terlebih dulu dengan menggunakan kanal AWGN. Simulasi dari modulasi BPSK yang digunakan pada sistem OFDM yang diusulkan ini akan dibandingkan dengan teori BER seperti yang dirumuskan pada

persamaan (2.26). Sehingga, hasil dari sistem OFDM dengan modulasi BPSK pada model kanal AWGN secara simulasi dan teori dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 3.14. Hasil simulasi sistem modulasi BPSK yang diusulkan pada model kanal AWGN tersebut sudah sesuai dengan teori dari persamaan *bit error rate* untuk modulasi BPSK. Sedangkan, nilai *threshold* BER yang diinginkan untuk simulasi sistem pada model kanal AWGN adalah  $10^{-3}$ . Oleh karena itu, pada sistem OFDM dengan modulasi BPSK yang diusulkan membutuhkan 6,6 dB untuk mencapai nilai BER  $10^{-3}$ .

Selain itu, jika dilihat dari bentuk konstelasi simbol untuk modulasi BPSK dapat diilustrasikan pada Gambar 3.13. Pada simulasi sistem yang diusulkan, konstelasi simbol dari modulasi BPSK saat ditransmisikan oleh pengirim tepat berada pada *decision area* saat diterima oleh penerima. Terdapat 2 simbol yang terbentuk pada modulasi BPSK yaitu bit '1' dan bit '0'. Setiap 1 simbol BPSK hanya mewakili 1 bit informasi sehingga modulasi BPSK memiliki *data rate* yang rendah jika dibandingkan dengan modulasi yang lainnya.



Gambar 3.12 Simulasi BER BPSK pada Kanal AWGN



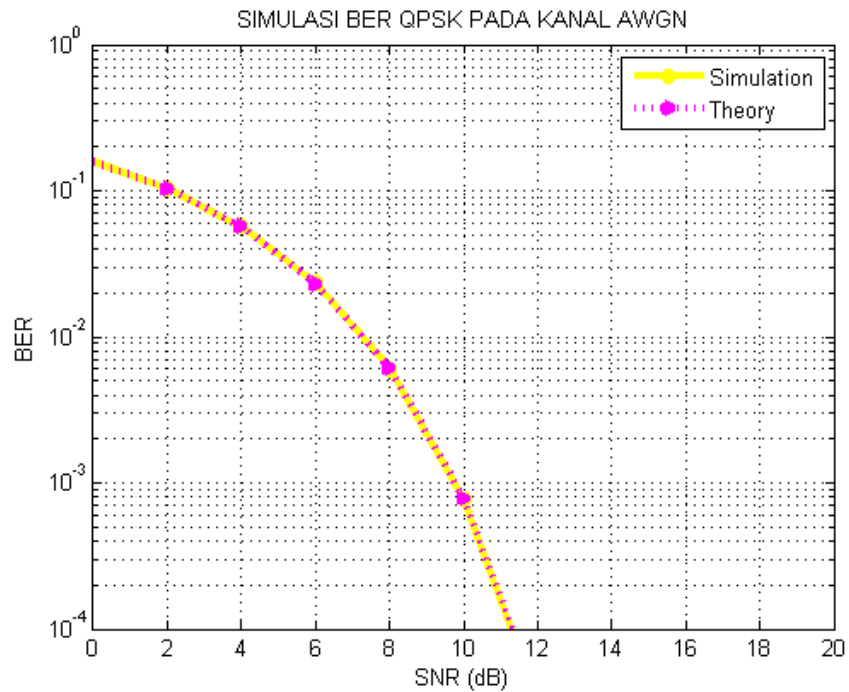
Gambar 3.13 Konstelasi Simbol Modulasi BPSK

### 3.10.2 QPSK Kanal AWGN

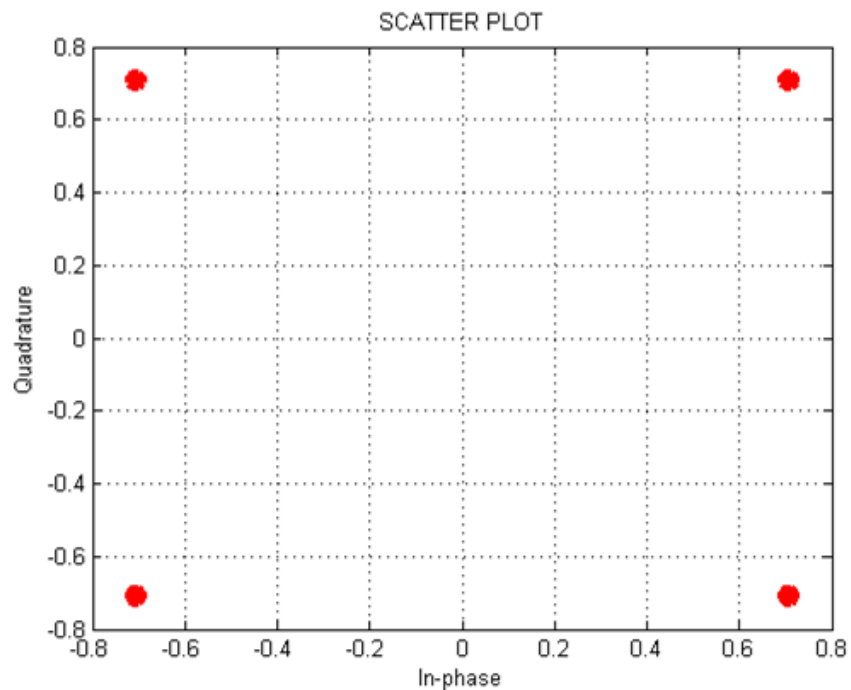
Modulasi kedua yang digunakan adalah modulasi QPSK. Langkah awal yang harus dilakukan untuk verifikasi sistem yang diusulkan juga sama dengan modulasi BPSK yaitu dengan cara membandingkan antara hasil simulasi dengan teori yang ada. Parameter pembanding yang digunakan adalah dengan melihat peluang kesalahan bit pada sistem OFDM di penerima seperti pada persamaan (2.26). Sehingga, hasil simulasi dari modulasi QPSK yang diusulkan dengan teorinya dapat dilihat pada Gambar 3.14. Jika dilihat hasil simulasi sistem modulasi QPSK yang diusulkan pada model kanal AWGN tersebut sudah sesuai dengan teori dari persamaan *bit error rate* untuk modulasi QPSK. Sedangkan, nilai *threshold* BER yang diinginkan untuk simulasi sistem pada model kanal AWGN dengan modulasi QPSK yang diusulkan yaitu  $10^{-3}$ . Oleh karena itu, pada sistem OFDM dengan modulasi BPSK yang diusulkan membutuhkan 9,75 dB untuk mencapai nilai BER  $10^{-3}$ .

Selain itu, konstelasi simbol yang dihasilkan dari simulasi sistem dapat dilihat pada Gambar 3.15. Pada simulasi sistem yang diusulkan, konstelasi simbol dari modulasi QPSK pada saat ditransmisikan oleh pengirim sudah tepat berada

pada *decision area* saat diterima oleh penerima. Terdapat 4 simbol dalam modulasi QPSK yaitu bit ‘00’, ‘01’, ‘10’, dan ‘11’. Setiap 1 simbol QPSK mewakili 2 bit informasi sehingga *data rate* dari modulasi QPSK lebih tinggi daripada BPSK.



Gambar 3.14 Simulasi BER QPSK pada Kanal AWGN



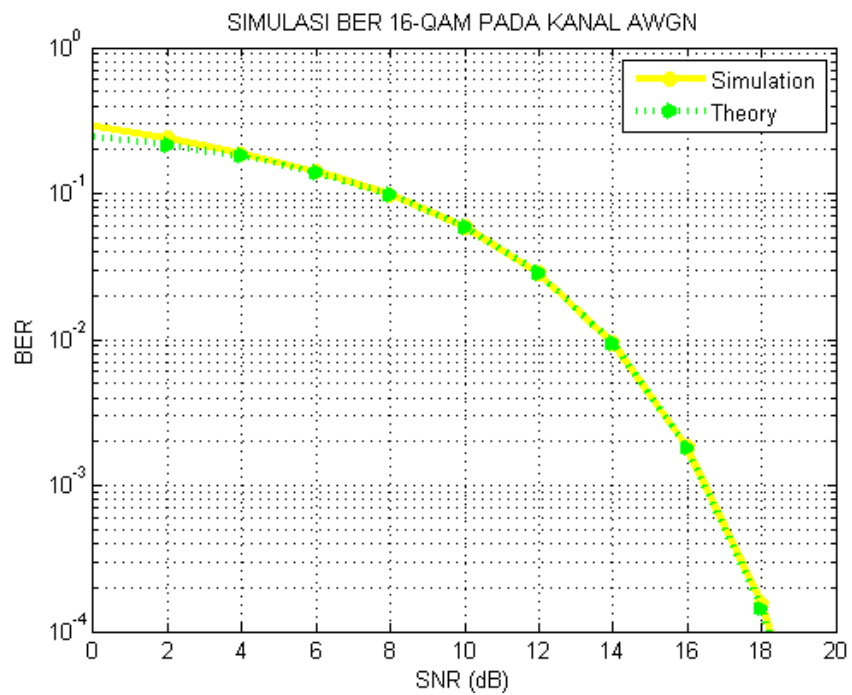
Gambar 3.15 Konstelasi Simbol Modulasi QPSK



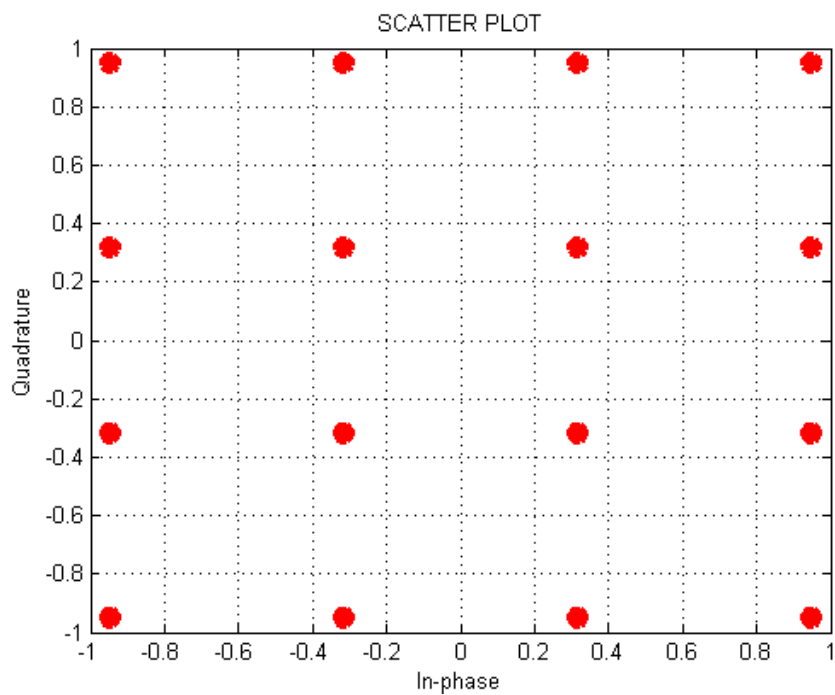
### 3.10.3 16-QAM Kanal AWGN

Modulasi ketiga yang digunakan adalah modulasi 16-QAM. Parameter verifikasi yang dilakukan sama seperti dua modulasi sebelumnya yaitu dengan cara membandingkan hasil simulasi sistem dengan teori dari persamaan BER untuk modulasi 16-QAM seperti pada persamaan (2.27). Hasil simulasi dari kinerja sistem yang diusulkan pada modulasi 16-QAM dapat dilihat pada Gambar 3.16. Berdasarkan dua kurva antara kinerja BER pada simulasi sistem dan hasil teori dari rumus *bit error rate* (BER) pada modulasi 16-QAM terlihat berhimpit, itu artinya simulasi sistem yang diujikan untuk model kanal AWGN yang diusulkan sudah sesuai dengan teori yang ada. Nilai *threshold* BER yang diinginkan untuk simulasi sistem pada model kanal AWGN yang diusulkan ini adalah  $10^{-3}$ . Oleh karena itu, modulasi 16-QAM membutuhkan 16,5 dB untuk mencapai nilai BER  $10^{-3}$ .

Selain itu, konstelasi simbol yang dihasilkan dari simulasi sistem dapat dilihat pada Gambar 3.17. Pada simulasi sistem yang diusulkan, konstelasi simbol dari modulasi 16-QAM pada saat ditransmisikan oleh pengirim sudah tepat berada pada *decision area* saat diterima oleh penerima. Terdapat 16 simbol dalam modulasi 16-QAM. Setiap 1 simbol dari modulasi 16-QAM mewakili 4 bit informasi. Sehingga, semua simbol yang terbentuk dari modulasi 16-QAM adalah sebagai berikut yaitu 0000, 0001, 0010, 0011, 0100, 0101, 0110, 0111, 1000, 1001, 1010, 1011, 1100, 1101, 1110, 1111. Salah satu keuntungan yang dimiliki oleh sinyal yang ditransmisikan dengan modulasi 16-QAM adalah memiliki *data rate* yang tinggi. Jika dibandingkan dengan modulasi yang lainnya seperti BPSK dan QPSK, maka modulasi 16-QAM memiliki *data rate* tertinggi. Oleh karena itu, jika diimplementasikan ke dalam teknologi VANET maka penggunaan modulasi 16-QAM sangat cocok digunakan untuk mentransmisikan data ketika kondisi kanal bagus. Selain memiliki *data rate* yang tinggi, modulasi 16-QAM juga memiliki daya pancar yang kuat sehingga satu simbol dapat membawa 4 bit informasi. Namun, kerugian yang dialami oleh sinyal ketika kondisi kanal buruk adalah kesalahan bit yang diterima di penerima semakin besar karena 1 simbol membawa 4 bit informasi. Sehingga, modulasi 16-QAM rentan mengalami BER tinggi ketika kondisi kanal buruk yaitu ketika nilai gain kanal sistem rendah.



Gambar 3.16 Simulasi BER 16-QAM pada Kanal AWGN



Gambar 3.17 Konstelasi Simbol Modulasi 16-QAM

### 3.11 Verifikasi Simulasi Sistem Model Kanal Rayleigh

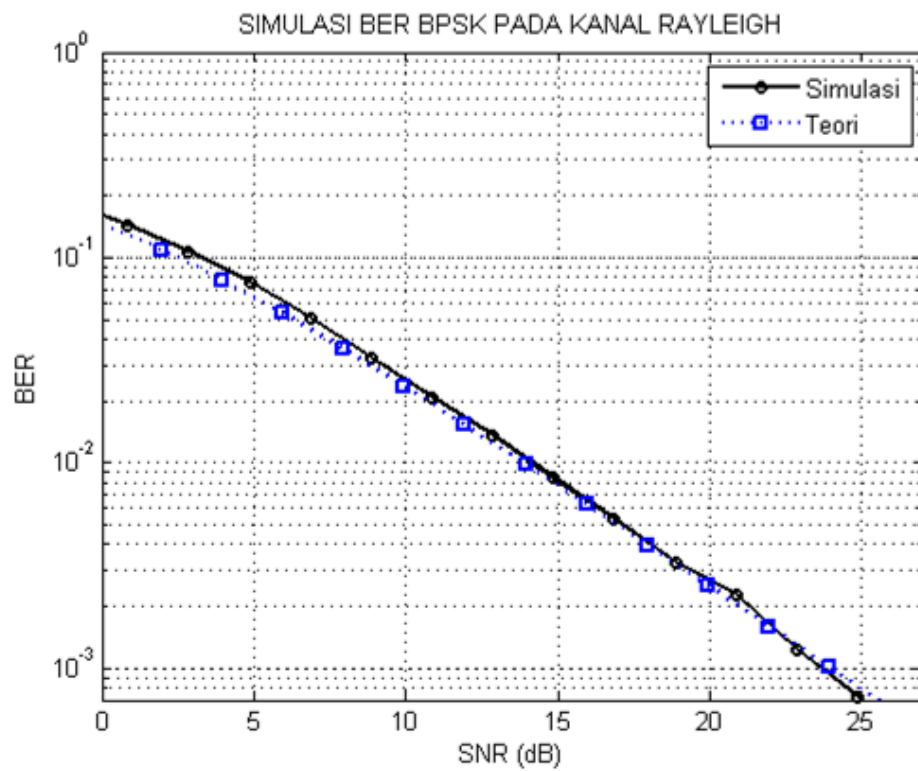
Seperti sub bab sebelumnya mengenai verifikasi sistem, maka pada sub bab ini pembahasan yang dibuat masih seputar tiga modulasi yang digunakan yaitu BPSK, QPSK, dan 16-QAM. Namun, verifikasi sistem yang dilakukan sekarang diimplementasikan pada model kanal yang kedua yaitu kanal Rayleigh. Parameter yang digunakan dengan melihat perbandingan kinerja sistem yang diusulkan dengan teori yang ada pada setiap modulasi. Kinerja suatu sistem dapat diketahui dari nilai BER yang didapatkan dari hasil simulasi. Pada kanal Rayleigh, faktor yang perlu diperhatikan selain dari noise adalah pengaruh dari amplitud fading yang fluktuatif akibat *multipath*. Hal itu tentu mempengaruhi kinerja dari suatu sistem bahkan kualitas daya di penerima bisa melemah akibat dari fading tersebut.

#### 3.11.1 BPSK Kanal Rayleigh

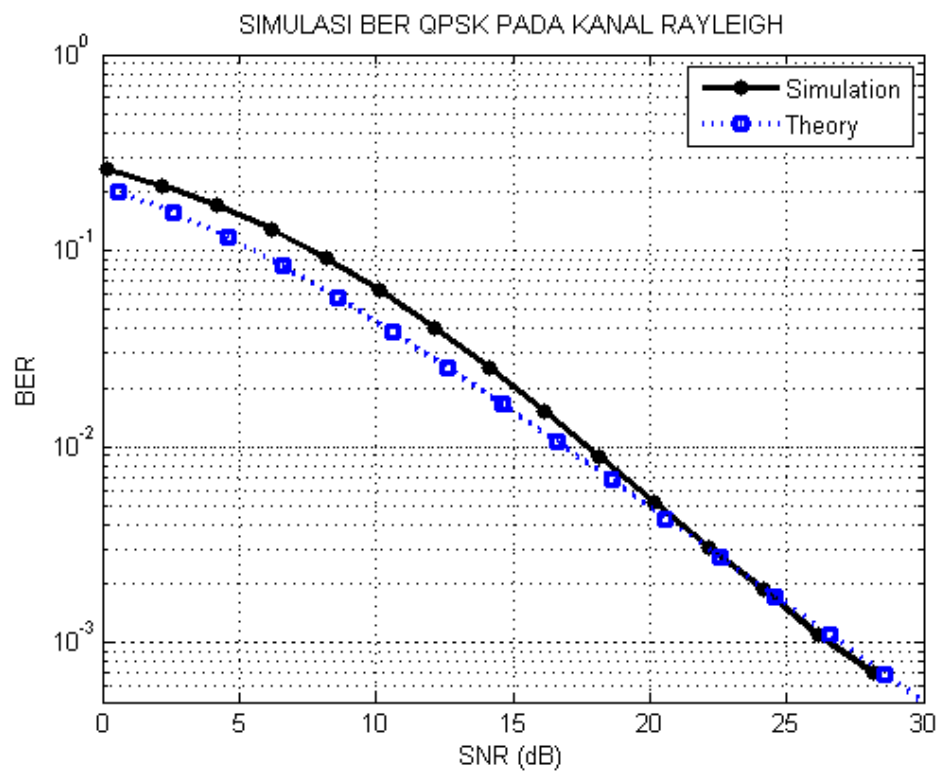
Pada kanal Rayleigh, *threshold* yang digunakan untuk mengetahui kinerja sistem yaitu  $10^{-3}$ . Secara teori perhitungan teori dari BER Rayleigh seperti pada persamaan (2.29). Sedangkan hasil kinerja BER dari simulasi sistem OFDM yang diusulkan terlihat seperti pada Gambar 3.18. Jika dibandingkan hasil kurva antara teori dan simulasi pada modulasi BPSK sudah sejajar namun belum berhimpit. Pada SNR rendah terlihat ada sedikit perbedaan yang sangat kecil namun ketika mencapai nilai *threshold* kedua kurva sudah berhimpit. Sehingga, modulasi BPSK membutuhkan 24 dB untuk mencapai nilai BER  $10^{-3}$ .

#### 3.11.2 QPSK Kanal Rayleigh

Modulasi kedua yang digunakan adalah modulasi QPSK. Hasil dari kinerja sistem OFDM pada kanal Rayleigh ditunjukkan pada Gambar 3.19. Teori dari BER QPSK sesuai dengan persamaan (2.30). Jika dibandingkan hasil kurva antara teori dan simulasi pada modulasi QPSK terlihat sejajar namun belum berhimpit. Pada SNR rendah terlihat ada sedikit perbedaan yang sangat kecil namun ketika mencapai SNR 18 dB kedua kurva sudah mulai berhimpit. Hal itu tentu disebabkan oleh pengaruh dari kondisi fading pada sistem komunikasi OFDM. Sehingga modulasi QPSK membutuhkan daya yang lebih besar dibandingkan dengan modulasi BPSK yaitu 26,5 dB untuk mencapai nilai BER  $10^{-3}$ .



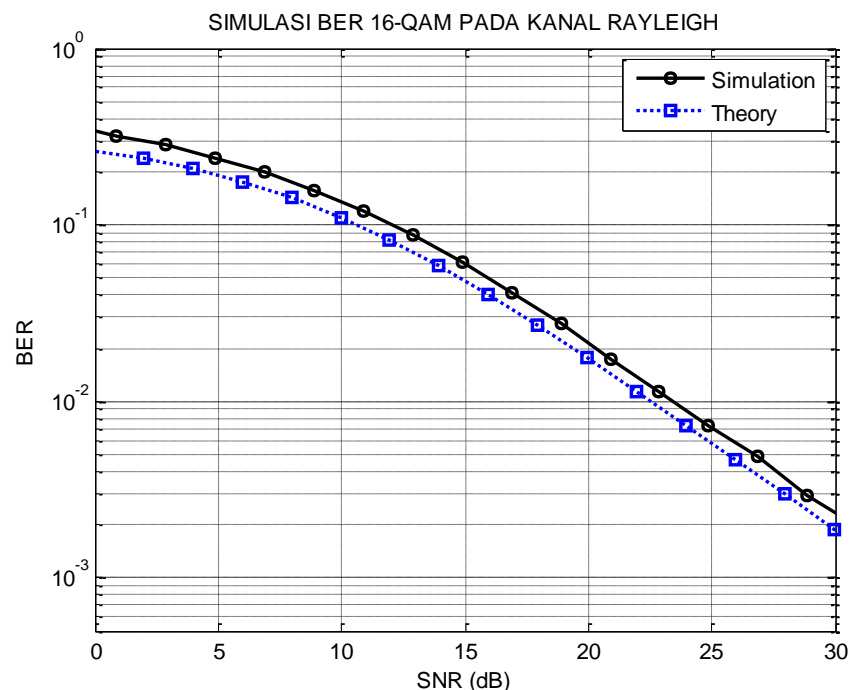
Gambar 3.18 Simulasi BER BPSK pada Kanal Rayleigh



Gambar 3.19 Simulasi BER QPSK pada Kanal Rayleigh

### 3.11.3 16-QAM Kanal Rayleigh

Modulasi ketiga yang digunakan adalah modulasi 16-QAM. Teori dari BER untuk modulasi 16-QAM sesuai dengan persamaan (2.31) . Hasil simulasi sistem dapat dilihat pada Gambar 3.20. Jika dibandingkan kedua kurva tersebut sejajar, yang artinya sistem yang diusulkan pada kanal Rayleigh untuk modulasi 16-QAM hampir mendekati nilai BER secara teoritis. Namun, jika dibandingkan dengan kedua modulasi sebelumnya yaitu modulasi BPSK dan QPSK, maka modulasi 16-QAM belum mampu mencapai nilai BER *threshold* yang ditentukan yaitu  $10^{-3}$ . Hal itu dikarenakan besarnya pengaruh fading terhadap orde modulasi yang semakin tinggi sehingga dapat menyebabkan ortogonalitas dari sistem OFDM terganggu dan dampaknya nilai BER sistem ikut meningkat. Selain itu, pengaruh orde modulasi yang tinggi membutuhkan daya kirim semakin besar namun adanya pengaruh fading tersebut menyebabkan pelemahan daya terima di penerima. Sehingga konsekuensinya kemungkinan terjadi kesalahan bit yang lebih besar jika kondisi kanal buruk. Hal ini bisa ditunjukkan dengan perolehan *threshold* BER yang belum tercapai. Namun jika mencoba melihat dari kinerja untuk nilai BER  $10^{-2}$  maka modulasi 16-QAM membutuhkan SNR sebesar 23.6 dB untuk mencapainya.



Gambar 3.20 Simulasi BER 16-QAM pada Kanal Rayleigh

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 4**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Pendahuluan**

Pada bagian ini terdapat pembahasan mengenai hasil simulasi dari implementasi modulasi adaptif menggunakan kanal AWGN dan frekuensi selektif Rayleigh fading. Perbandingan kinerja BER dari modulasi adaptif dan non-adaptif dengan variasi frekuensi Doppler normalisasi akan disertakan dalam pembahasan ini. Kemudian, penjelasan mengenai kapasitas kanal pada variasi frekuensi Doppler normalisasi juga akan dianalisis lebih lanjut.

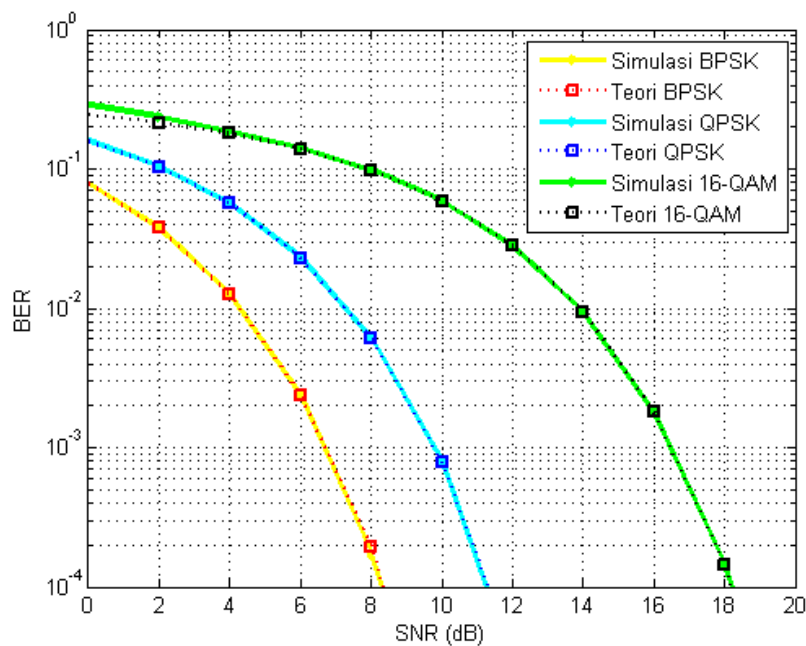
#### **4.2 Uji Kinerja Sistem pada Kanal AWGN**

Pada sub bab ini akan ditunjukkan hasil simulasi pada kanal AWGN. Pembahasan pertama mengenai kinerja modulasi non-adaptif (BPSK, QPSK, dan 16-QAM). Parameter yang dilihat adalah kinerja BER dari sistem yang telah diusulkan. Ada pula pembahasan selanjutnya yaitu mengenai kondisi dari modulasi adaptif dengan tiga *threshold* yang berbeda-beda untuk mengetahui kemampuan adaptif suatu sistem dan didapatkan kinerja modulasi adaptif yang optimal pada kanal AWGN. Parameter yang dibahas adalah kinerja BER dan analisis kapasitas sistem dari ketiga *threshold* yaitu 0.2 dan 0.4 ; 0.3 dan 0.5; 0.5 dan 0.7.

##### **4.2.1 Hasil Simulasi Modulasi Non-Adaptif pada Kanal AWGN**

Hasil kinerja dari modulasi non-adaptif seperti modulasi BPSK, QPSK, dan 16-QAM pada kanal AWGN ditunjukkan pada Gambar 4.1. Hasil yang ditunjukkan pada simulasi sistem juga dibandingkan dengan teori BER dan SNR untuk setiap modulasi yang digunakan. Seperti verifikasi sistem pada bab 3 yang menunjukkan bahwa uji sistem yang digunakan pada kanal AWGN sudah sesuai dengan teorinya. Hal itu ditunjukkan dengan perolehan grafik nilai BER dan SNR yang berhimpit antara hasil simulasi dengan teorinya. Pada sistem ini, BER yang diinginkan adalah  $10^{-4}$ . Batasan nilai SNR yang digunakan untuk *switch* dari satu modulasi ke level modulasi lain yaitu dituliskan pada Tabel 4.1. Pada tabel terlihat bahwa modulasi

BPSK lebih efisien daya dan tahan terhadap noise dibandingkan dengan kedua modulasi yang lain. Hal itu dibuktikan bahwa sistem dengan modulasi BPSK mencapai BER  $10^{-4}$  dengan membutuhkan nilai SNR sebesar 8.32 dB. Lain halnya dengan modulasi 16-QAM yang membutuhkan daya lebih besar ketika mentransmisikan sinyal yaitu membutuhkan nilai SNR sebesar 18.2 dB. Namun, modulasi 16-QAM membawa jumlah data yang lebih banyak karena 1 simbol mewakili 4 bit informasi. Sehingga, dari penjelasan tersebut menunjukkan bahwa modulasi 16-QAM memerlukan daya yang lebih besar dibandingkan dengan modulasi yang lainnya. Namun, konsekuensi dari modulasi 16-QAM yang dapat membawa informasi lebih banyak tersebut adalah rentan terkena noise jika kondisi kanal memburuk. Sehingga menimbulkan probabilitas kesalahan bit semakin besar.



Gambar 4.1 Kinerja BER pada Kanal AWGN dengan Modulasi Non-Adaptif

Tabel 4.1 Perbandingan Kinerja Modulasi Non-Adaptif untuk BER  $10^{-4}$  pada Kanal AWGN

Mode Transmisi	SNR [dB]
Mode 1 (BPSK)	< 8.32 dB
Mode 2 (QPSK)	8.32 dB < SNR < 18.2 dB
Mode 3 (16-QAM)	>18.2 dB

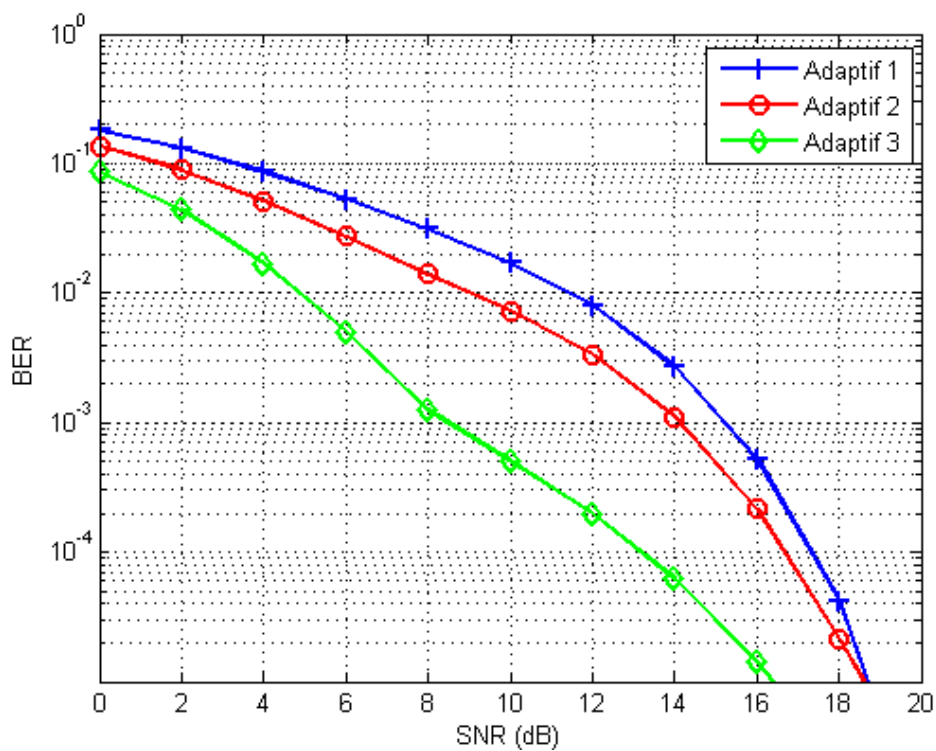


#### 4.2.2 Hasil Simulasi Modulasi Adaptif dengan Variasi *Threshold* pada Kanal AWGN

Hasil uji kinerja dari modulasi adaptif dengan variasi *threshold* pada kanal AWGN ditampilkan pada Gambar 4.2. BER sistem yang diinginkan untuk sistem modulasi adaptif ini yaitu sebesar  $10^{-4}$ . Modulasi adaptif ini diuji kinerjanya dengan menggunakan 3 *threshold* yaitu yang pertama 0.2 dan 0.4, yang kedua 0.3 dan 0.5, dan yang ketiga 0.5 dan 0.7. Dari ketiga *threshold* tersebut, modulasi adaptif dapat mencapai BER yang diinginkan oleh sistem seperti yang terlihat pada Tabel 4.2. Modulasi adaptif dengan *threshold* 0.2 dan 0.4 memiliki nilai SNR paling rendah jika dibandingkan dengan *threshold* lainnya yaitu sebesar 12.6 dB untuk mencapai BER  $10^{-4}$ . Modulasi adaptif dengan *threshold* 0.5 dan 0.7 membutuhkan SNR terbesar yaitu 17.1 dB untuk mencapai nilai BER yang diinginkan.

Sedangkan alokasi bit yang didapatkan pada variasi *threshold* dapat dilihat pada Tabel 4.3. Kapasitas paling besar terjadi pada *threshold* 0.2 dan 0.4 yaitu penerima dapat menerima bit informasi sebanyak 1.536.045 bit, sedangkan *threshold* kedua yaitu 0.3 dan 0.5 mampu mencapai kapasitas sistem sebesar 1.140.467 bit, dan kapasitas terendah terjadi pada *threshold* terakhir yaitu 0.5 dan 0.7 untuk bit informasi yang diterima dengan benar sebesar 836.356 bit. Hal itu menunjukkan bahwa level *threshold* yang ditentukan memberikan informasi ke pengirim untuk memodulasikan bit informasi sesuai dengan level *threshold*nya, bisa dengan modulasi BPSK, QPSK, atau 16-QAM sehingga kapasitas sistem yang didapatkan untuk masing-masing *threshold* pun berbeda-besa sesuai dengan kemampuan adaptif sistem yang diujikan.

Namun, jika dibandingkan dengan modulasi non-adaptif (BPSK) yang hanya memiliki kapasitas kanal 800.000 bit, maka sistem OFDM pada modulasi adaptif dengan kondisi kanal AWGN mampu meningkatkan kapasitas sistem. Peningkatan uji kapasitas sistem tertinggi mencapai 92% pada kondisi pertama yaitu dengan *threshold* 0.2 dan 0.4.



Gambar 4.2 Kinerja Modulasi Adaptif pada Kanal AWGN dengan Variasi *Threshold*

Tabel 4.2 Perbandingan Kinerja Adaptif untuk BER  $10^{-4}$  pada Kanal AWGN

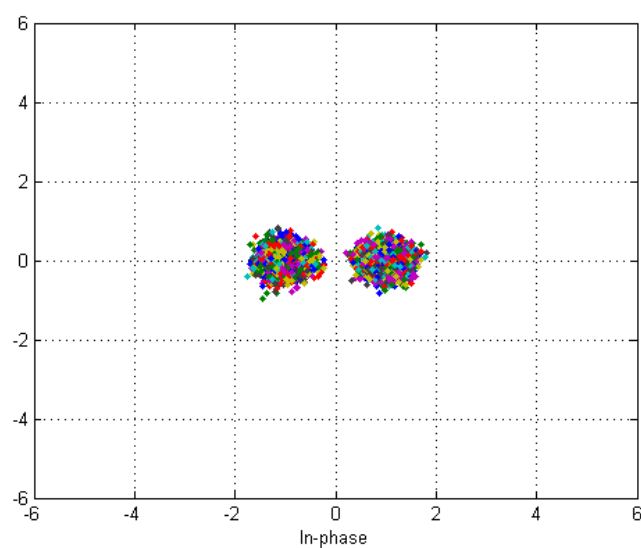
Mode Transmisi	<i>Threshold</i>	SNR [dB]
Adaptif 1	0.2 dan 0.4	13.1 dB
Adaptif 2	0.3 dan 0.5	16.7 dB
Adaptif 3	0.5 dan 0.7	17.4 dB

Tabel 4.3 Perbandingan Alokasi Bit pada Variasi *Threshold* Modulasi Adaptif untuk kanal AWGN

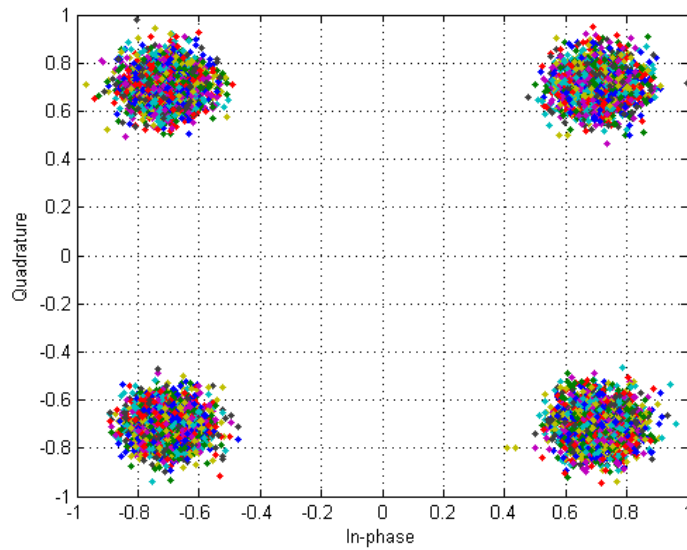
Mode Transmisi	<i>Threshold</i>	Kapasitas Kanal
Non-Adaptif (BPSK)	-	800.000
Adaptif 1	0.2 dan 0.4	1.536.045
Adaptif 2	0.3 dan 0.5	1.140.467
Adaptif 3	0.5 dan 0.7	836.356

#### 4.2.3 Hasil Konstelasi Simbol pada Kanal AWGN

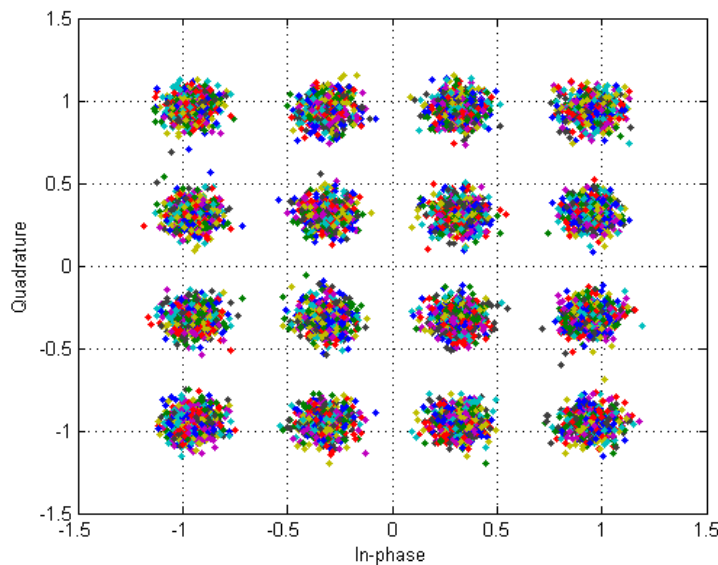
Pada bab sebelumnya sudah dijelaskan mengenai hasil konstelasi simbol pada modulasi BPSK, QPSK, dan 16-QAM sebagai verifikasi sistem OFDM pada modulasi adaptif. Konstelasi simbol yang didapatkan dari simulasi sistem menggunakan MATLAB sudah sesuai dengan teori yang ada. Selanjutnya, pada sub bab ini membahas mengenai hasil konstelasi simbol pada kanal AWGN yang dipengaruhi oleh noise dengan SNR 20 dB. Hasil konstelasi simbol untuk modulasi BPSK ditunjukkan pada Gambar 4.3, sedangkan untuk modulasi QPSK ditunjukkan pada Gambar 4.4, dan terakhir modulasi 16-QAM ditunjukkan oleh Gambar 4.5. Dari ketiga gambar tersebut terlihat bahwa kondisi dari konstelasi simbol untuk setiap modulasi menyebar tapi masih dalam batas *decision area*, sehingga gangguan yang terjadi pada sistem OFDM ini hanya disebabkan oleh noise yang diatur dengan nilai  $\text{SNR} = 20 \text{ dB}$  untuk semua modulasi yang disimulasikan. Jika nilai SNR dinaikkan maka pengaruh noise dalam konstelasi simbol akan semakin mengecil dan lama-kelamaan akan membentuk konstelasi simbol yang sempurna yaitu sesuai dengan teorinya seperti yang sudah ditunjukkan pada sub bab verifikasi sistem. Jadi pengaruh noise pada uji sistem kanal AWGN ini membentuk *scatter plot* atau konstelasi simbol pada setiap modulasinya menyebar dan pengaruh pergeseran Doppler belum terjadi untuk kondisi pada kasus kanal AWGN.



Gambar 4.3 Konstelasi Simbol BPSK dengan SNR 20 dB



Gambar 4.4 Konstelasi Simbol QPSK dengan SNR 20 dB



Gambar 4.5 Konstelasi Simbol 16-QAM dengan SNR 20 dB

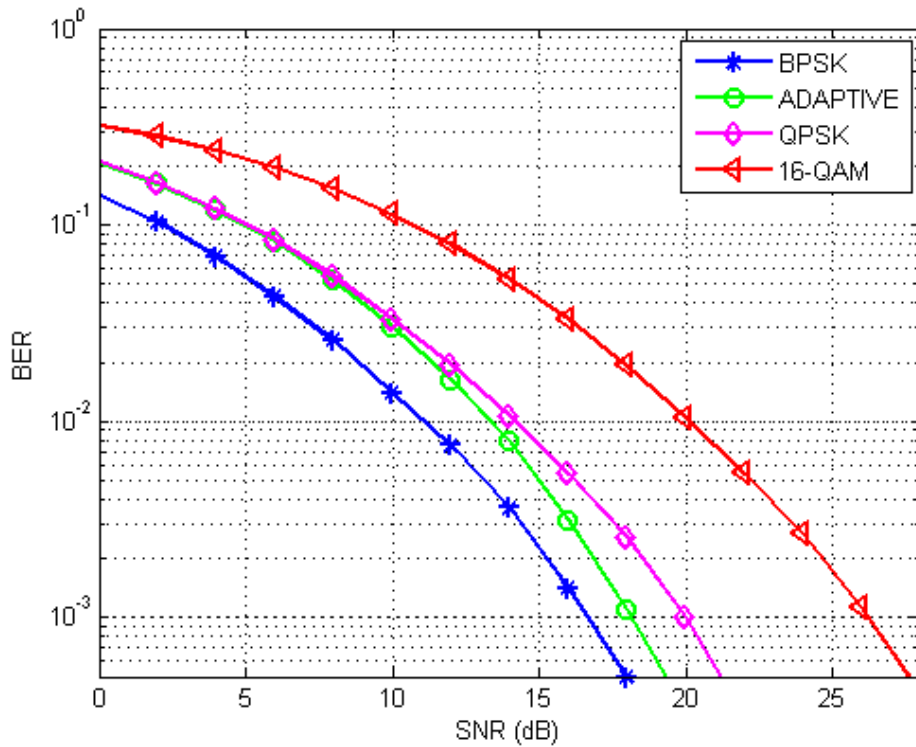
### 4.3 Uji Kinerja Sistem pada Kanal Frekuensi Selektif Fading

Hasil dari simulasi OFDM dengan modulasi adaptif yang diusulkan pada kanal frekuensi selektif fading akan dibahas pada sub bab ini. Pembahasan pertama mengenai perbandingan dari modulasi adaptif dan modulasi non-adaptif dengan frekuensi normalisasi Doppler yang rendah yaitu  $f_d = 0.000128$ . Hal itu bertujuan untuk mengetahui kinerja sistem adaptif yang dilihat dari kebutuhan nilai SNR untuk mencapai nilai BER yang diinginkan. Pembahasan kedua mengenai variasi

*threshold* yang diimplementasikan pada modulasi adaptif untuk melihat kemampuan adaptif suatu sistem. Selanjutnya variasi frekuensi Doppler normalisasi juga digunakan sebagai parameter untuk mengetahui kinerja suatu sistem. Frekuensi Doppler normalisasi yang digunakan untuk uji sistem pada modulasi adaptif ini yaitu  $f_d = 0.000128$ ,  $f_d = 0.00128$ , dan  $f_d = 0.0128$ . Pembahasan terakhir mengenai analisis kondisi CCDF pada gain kanal dengan variasi frekuensi Doppler normalisasi. Selain itu, ada pula pembahasan mengenai kapasitas sistem yang didapatkan untuk setiap uji kinerja sistem pada modulasi adaptif pada kanal frekuensi selektif fading. Hal itu bertujuan untuk mengetahui peningkatan kapasitas sistem jika dibandingkan dengan modulasi non-adaptif (BPSK).

#### **4.3.1 Hasil Simulasi Modulasi Adaptif dan Non-Adaptif pada Kanal Frekuensi Selektif Fading**

Kurva BER perbandingan simulasi pada kanal frekuensi selektif fading pada sistem OFDM antara menggunakan modulasi adaptif dan modulasi non-adaptif seperti BPSK, QPSK, dan 16-QAM terlihat pada Gambar 4.6. Uji sistem pada simulasi ini menggunakan frekuensi Doppler normalisasi dengan  $f_d = 0.000128$ . Kinerja BER yang diinginkan pada kondisi ini adalah  $10^{-3}$ . Jika dilihat dari gambar tersebut, semua modulasi dapat memenuhi kondisi dengan BER yang diinginkan. Kebutuhan SNR dari kedua kondisi antara modulasi adaptif dan non-adaptif dapat dilihat pada Tabel 4.4. Modulasi BPSK membutuhkan SNR terendah untuk mencapai BER  $10^{-3}$  yaitu sebesar 16.6 dB. Sedangkan, pada modulasi 16-QAM membutuhkan SNR tertinggi untuk mencapai nilai BER yang diinginkan yaitu sebesar 26.2 dB. Hal itu terjadi karena kondisi kanal yang buruk akibat pengaruh fading yang besar sehingga menyebabkan tingkat kesalahan bit yang meningkat serta membutuhkan daya yang lebih besar untuk mencapai target BER yang diinginkan. Jika dilihat kondisi dari modulasi 16-QAM membawa 4 bit setiap satu simbol dikirimkan, oleh karena itu menyebabkan modulasi 16-QAM rentan terkena noise ketika kondisi kanalnya memburuk, sehingga hal itu diatasi dengan penggunaan daya yang lebih besar untuk mencapai BER yang diinginkan sistem.



Gambar 4.6 Perbandingan Hasil Kinerja Modulasi Adaptif dengan Modulasi Non-Adaptif pada Kanal Frekuensi Selektif Fading

Tabel 4.4 Perbandingan Kinerja Fix Modulasi untuk BER 10<sup>-3</sup> pada Kanal Frekuensi Selektif Fading

Mode Transmisi	SNR [dB]
BPSK	16.6 dB
Adaptif	18 dB
QPSK	20 dB
16-QAM	26.2 dB

#### 4.3.2 Hasil Simulasi Modulasi Adaptif dengan Variasi *Threshold*

Pada sub bab ini membahas mengenai hasil uji modulasi adaptif dengan variasi *threshold* seperti yang sudah ditentukan sebelumnya. Kanal yang digunakan adalah frekuensi selektif fading yang disimulasikan ke dalam 3 variasi frekuensi Doppler normalisasi yaitu pertama ketika kondisi kendaraan lambat (1m/s) yaitu dengan  $f_d = 0.000128$ , kedua ketika kondisi kendaraan melaju dengan kecepatan sedang (10m/s) yaitu dengan  $f_d = 0.00128$ , dan terakhir ketika kondisi kendaraan melaju dengan kecepatan cepat (100m/s) yaitu dengan  $f_d = 0.0128$ . Selain variasi

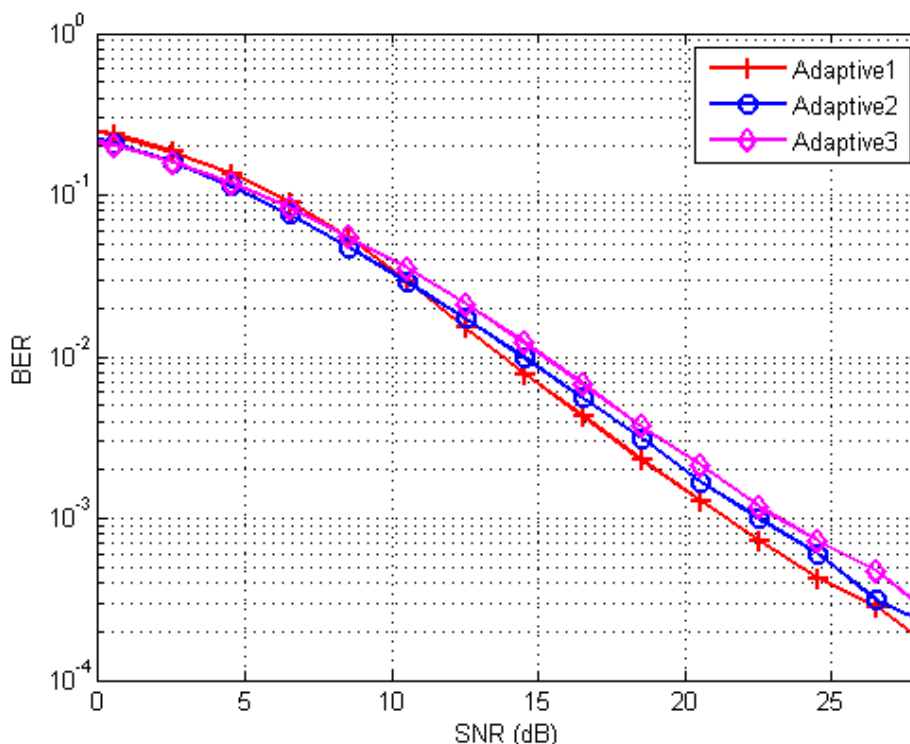
dari frekuensi Doppler normalisasi, uji simulasi pada kondisi ini juga digunakan untuk variasi *threshold* pada modulasi adaptif yaitu 0.2 dan 0.4; 0.3 dan 0.5; dan 0.5 dan 0.7. Dua parameter yang dianalisis dalam sub bab ini adalah yang pertama mengenai kinerja sistem yang ditandai dengan nilai BER serta yang kedua adalah peningkatan kapasitas sistem untuk setiap *threshold* pada modulasi adaptif dengan ketiga kondisi frekuensi Doppler normalisasi.

#### **4.3.2.1 Frekuensi Doppler Normalisasi – Lambat**

Pada Gambar 4.7 merupakan hasil uji kinerja sistem modulasi adaptif pada kanal frekuensi selektif fading untuk  $f_d = 0.000128$  yang setara dengan kecepatan kendaraan 1 m/s. BER yang diinginkan pada simulasi sistem ini yaitu  $10^{-3}$ . Kebutuhan nilai SNR pada Tabel 4.5 menunjukkan ketiga *threshold* yang diujikan pada modulasi adaptif. *Threshold* pertama yaitu 0.2 dan 0.4 membutuhkan nilai SNR sebesar 21.3 dB untuk mencapai BER  $10^{-3}$  sedangkan *threshold* kedua yaitu 0.3 dan 0.5 membutuhkan nilai SNR 22.5 dB dan *threshold* yang terakhir yaitu 0.5 dan 0.7 membutuhkan nilai SNR lebih besar 4 dB jika dibandingkan dengan *threshold* pertama yaitu 25.2 dB. Jadi, kondisi ketiga *threshold* pada modulasi adaptif untuk  $f_d = 0.000128$  ini mampu memberikan kinerja yang lebih baik jika dibandingkan dengan modulasi non-adaptif (BPSK, QPSK). Selain itu nilai BER yang diinginkan yaitu  $10^{-3}$  juga dapat dicapai.

Parameter lainnya, selain BER adalah kapasitas sistem. Kapasitas sistem dari modulasi adaptif untuk ketiga *threshold* ini dihitung jumlahnya untuk kemudian dibandingkan dengan modulasi non-adaptif (BPSK). Kapasitas sistem dihitung berdasarkan jumlah bit benar yang diterima di penerima. Pada Tabel 4.6 menunjukkan hasil dari kapasitas sistem untuk modulasi adaptif dan non-adaptif (BPSK). Ketiga *threshold* pada modulasi adaptif memiliki kapasitas sistem yang lebih besar jika dibandingkan dengan modulasi non-adaptif. Hasil yang didapatkan pada *threshold* pertama (0.2 dan 0.4) menunjukkan bahwa modulasi adaptif mampu mengirimkan data dengan benar sampai ke penerima sebesar 1.441.081 bits. Sedangkan pada modulasi adaptif dengan *threshold* kedua (0.5 dan 0.7) hanya mampu mentransmisikan data dengan benar sebesar 827.589 bits atau setara dengan peningkatan kapasitas sistem sebesar 3% jika dibandingkan dengan modulasi non-

adaptif (BPSK). Perbedaan hasil dalam perhitungan kapasitas sistem untuk ketiga *threshold* pada modulasi adaptif menunjukkan bahwa kemampuan adaptif untuk masing-masing *threshold* berbeda-beda. Namun, penggunaan modulasi adaptif masih memberikan kinerja lebih baik jika dibandingkan dengan modulasi non-adaptif untuk parameter peningkatan kapasitas sistem pada kanal frekuensi selektif fading dengan  $f_d = 0.000128$ .



Gambar 4.7 Kinerja BER dengan Variasi *Threshold* pada sistem Modulasi Adaptif dengan  $f_d = 0.000128$

Tabel 4.5 Perbandingan Kinerja Adaptif untuk BER  $10^{-3}$  pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan  $f_d = 0.000128$

Mode Transmisi	Threshold	SNR [dB]
Adaptif 1	0.2 dan 0.4	21.3 dB
Adaptif 2	0.3 dan 0.5	22.5 dB
Adaptif 3	0.5 dan 0.7	25.2 dB

Tabel 4.6 Perbandingan Kapasitas Modulasi Adaptif dan Non-Adaptif pada kanal Frekuensi Selektif Fading dengan  $f_d = 0.000128$

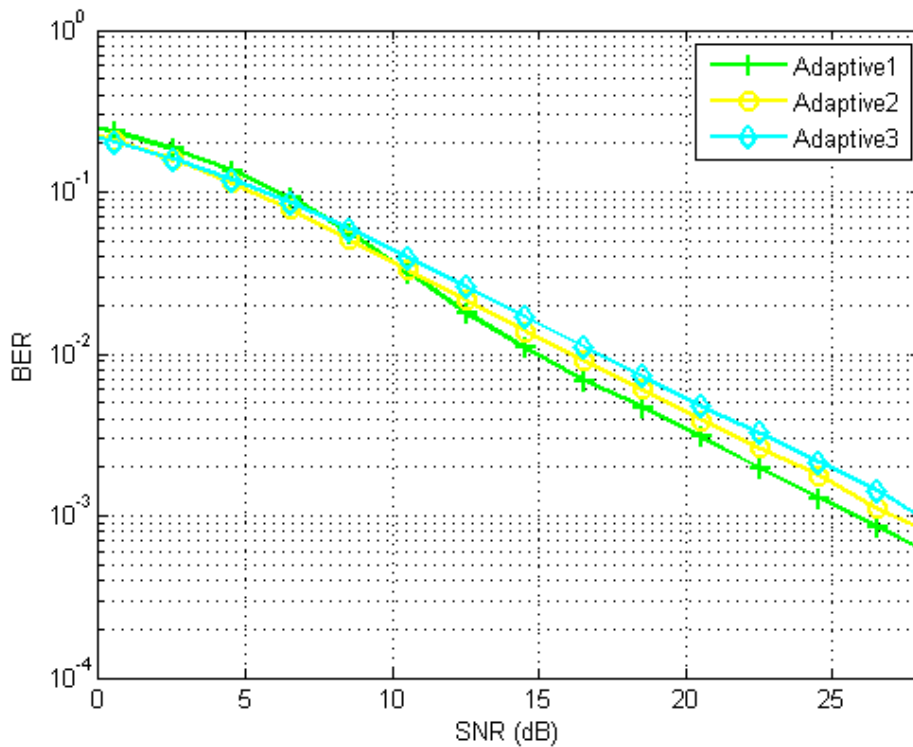
Mode Transmisi	Threshold	Kapasitas Kanal
Non-Adaptif (BPSK)	-	800.000 bits
Adaptif 1	0.2 dan 0.4	1.441.018 bits
Adaptif 2	0.3 dan 0.5	1.084.303 bits
Adaptif 3	0.5 dan 0.7	827.589 bits



#### 4.3.2.2 Frekuensi Doppler Normalisasi – Sedang

Pada Gambar 4.8 merupakan hasil uji kinerja sistem modulasi adaptif pada kanal frekuensi selektif fading untuk  $f_d = 0.00128$  yang setara dengan kecepatan kendaraan 10 m/s. BER yang diinginkan pada simulasi sistem ini yaitu  $10^{-3}$ . Kebutuhan nilai SNR pada Tabel 4.7 menunjukkan ketiga *threshold* yang diujikan pada modulasi adaptif. *Threshold* pertama yaitu 0.2 dan 0.4 membutuhkan nilai SNR sebesar 25.6 dB untuk mencapai BER  $10^{-3}$  sedangkan *threshold* kedua yaitu 0.3 dan 0.5 membutuhkan nilai SNR 27.1 dB dan *threshold* yang terakhir yaitu 0.5 dan 0.7 membutuhkan nilai SNR lebih besar 1 dB jika dibandingkan dengan *threshold* kedua yaitu 28.1 dB. Jadi, kondisi ketiga *threshold* pada modulasi adaptif untuk  $f_d = 0.00128$  ini mampu memberikan kinerja yang optimal karena nilai BER yang diinginkan yaitu  $10^{-3}$  masih dapat dicapai walaupun diberikan gangguan fading yang lebih besar sehingga mengakibatkan pergeseran Doppler yang semakin besar pula.

Pada Tabel 4.8 menunjukkan hasil dari kapasitas sistem untuk modulasi adaptif dan non-adaptif (BPSK). Ketiga *threshold* pada modulasi adaptif memiliki kapasitas sistem yang lebih besar jika dibandingkan dengan modulasi non-adaptif. Hasil yang didapatkan dari *threshold* pertama (0.2 dan 0.4), modulasi adaptif mampu mengirimkan data dengan benar sampai ke penerima sebesar 1.319.212 bits. Sedangkan pada modulasi adaptif dengan *threshold* 0.5 dan 0.7 hanya mampu mentransmisikan data dengan benar sebesar 818.386 bits atau setara dengan peningkatan kapasitas sistem sebesar 2% jika dibandingkan dengan modulasi non-adaptif (BPSK). Perbedaan hasil dalam perhitungan kapasitas sistem untuk ketiga *threshold* pada modulasi adaptif menunjukkan bahwa kemampuan adaptif untuk masing-masing *threshold* berbeda-beda. Namun, penggunaan modulasi adaptif masih memberikan kinerja lebih baik jika dibandingkan dengan modulasi non-adaptif untuk parameter hasil kapasitas sistem pada kanal frekuensi selektif fading dengan  $f_d = 0.00128$ .



Gambar 4.8 Kinerja BER dengan Variasi *Threshold* pada sistem Modulasi Adaptif dengan  $f_d = 0.00128$

Tabel 4.7 Perbandingan Kinerja Adaptif untuk BER  $10^{-3}$  pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan  $f_d = 0.00128$

Mode Transmisi	Threshold	SNR [dB]
Adaptif 1	0.2 dan 0.4	25.6 dB
Adaptif 2	0.3 dan 0.5	27.1 dB
Adaptif 3	0.5 dan 0.7	28.1 dB

Tabel 4.8 Perbandingan Kapasitas Modulasi Adaptif dan Non-Adaptif pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan  $f_d = 0.00128$

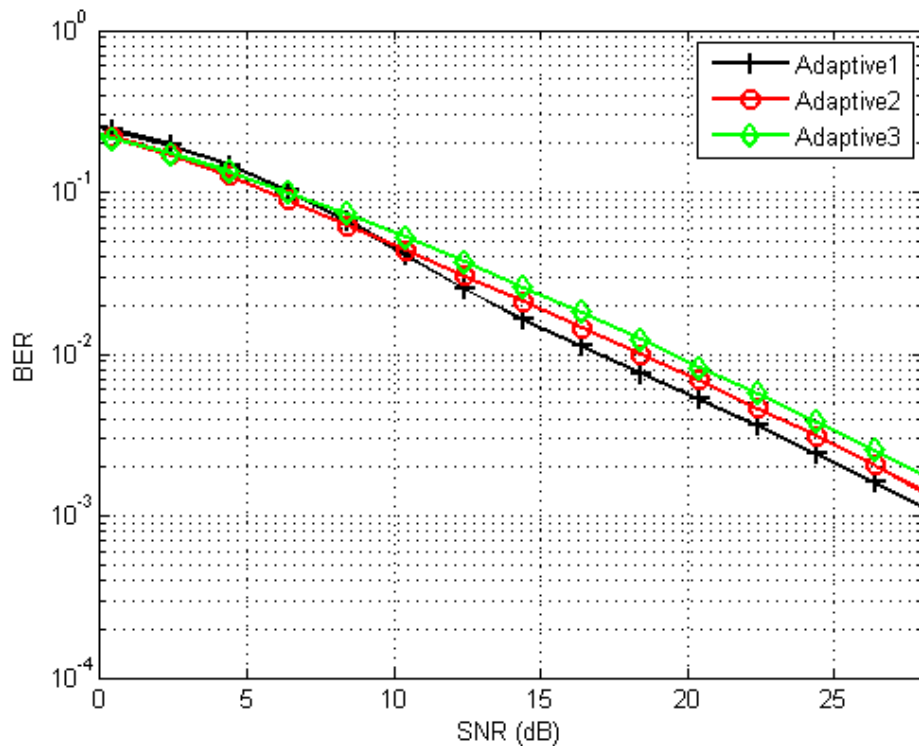
Mode Transmisi	Threshold	Kapasitas Kanal
Non-Adaptif (BPSK)	-	800.000 bits
Adaptif 1	0.2 dan 0.4	1.319.212 bits
Adaptif 2	0.3 dan 0.5	1.005.835 bits
Adaptif 3	0.5 dan 0.7	818.386 bits

#### 4.3.2.3 Frekuensi Doppler Normalisasi – Cepat

Pada Gambar 4.9 merupakan hasil uji kinerja sistem modulasi adaptif pada kanal frekuensi selektif fading untuk  $f_d = 0.0128$  yang setara dengan kecepatan

kendaraan 100 m/s. BER yang diinginkan pada simulasi sistem ini yaitu  $10^{-3}$  sama seperti uji sistem sebelumnya, namun kenyataannya setelah disimulasikan hasil BER yang didapatkan belum mampu mencapai BER yang diinginkan. Sehingga nilai BER yang digunakan untuk *threshold* dalam menentukan kebutuhan SNR dengan  $f_d = 0.0128$  ini yaitu  $10^{-2}$ . Kebutuhan nilai SNR yang menunjukkan ketiga *threshold* ketika diujikan pada modulasi adaptif dapat dilihat pada Tabel 4.9. *Threshold* pertama yaitu 0.2 dan 0.4 membutuhkan nilai SNR sebesar 17.1 dB untuk mencapai BER  $10^{-2}$  sedangkan *threshold* kedua yaitu 0.3 dan 0.5 membutuhkan nilai SNR 18.6 dB dan *threshold* yang ketiga yaitu 0.5 dan 0.7 membutuhkan nilai SNR sebesar 19.4 dB. Jadi, kondisi ketiga *threshold* pada modulasi adaptif untuk  $f_d = 0.0128$  ini belum mampu memberikan kinerja yang optimal karena nilai BER yang diinginkan yaitu  $10^{-3}$  belum dapat dicapai. Hal itu terjadi karena pengaruh dari gangguan fading yang besar sehingga mengakibatkan pergeseran Doppler yang semakin besar pula.

Pada Tabel 4.10 menunjukkan hasil dari kapasitas sistem untuk modulasi adaptif dan non-adaptif (BPSK). Ketiga *threshold* pada modulasi adaptif memiliki kapasitas sistem yang lebih besar jika dibandingkan dengan modulasi non-adaptif. Hasil yang didapatkan dari *threshold* pertama (0.2 dan 0.4) menunjukkan bahwa modulasi adaptif mampu mengirimkan data dengan benar sampai ke penerima sebesar 1.310.362 bits. *Threshold* kedua (0.3 dan 0.5) memiliki kapasitas sistem sebesar 1.008.858 bit. Sedangkan pada modulasi adaptif dengan *threshold* ketiga yaitu 0.5 dan 0.7 hanya mampu mentransmisikan data dengan benar sebesar 816.504 bits atau setara dengan peningkatan kapasitas sistem sebesar 2% jika dibandingkan dengan modulasi non-adaptif (BPSK). Perbedaan hasil dalam perhitungan kapasitas sistem untuk ketiga *threshold* pada modulasi adaptif menunjukkan bahwa kemampuan adaptif untuk masing-masing *threshold* berbeda-beda. Namun, penggunaan modulasi adaptif masih memberikan kinerja lebih baik jika dibandingkan dengan modulasi non-adaptif untuk parameter hasil kapasitas sistem pada kanal frekuensi selektif fading dengan  $f_d = 0.0128$ .



Gambar 4.9 Kinerja BER dengan Variasi *Threshold* pada sistem Modulasi Adaptif dengan  $f_d = 0.0128$

Tabel 4.9 Perbandingan Kinerja Adaptif untuk BER  $10^{-2}$  pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan  $f_d = 0.0128$

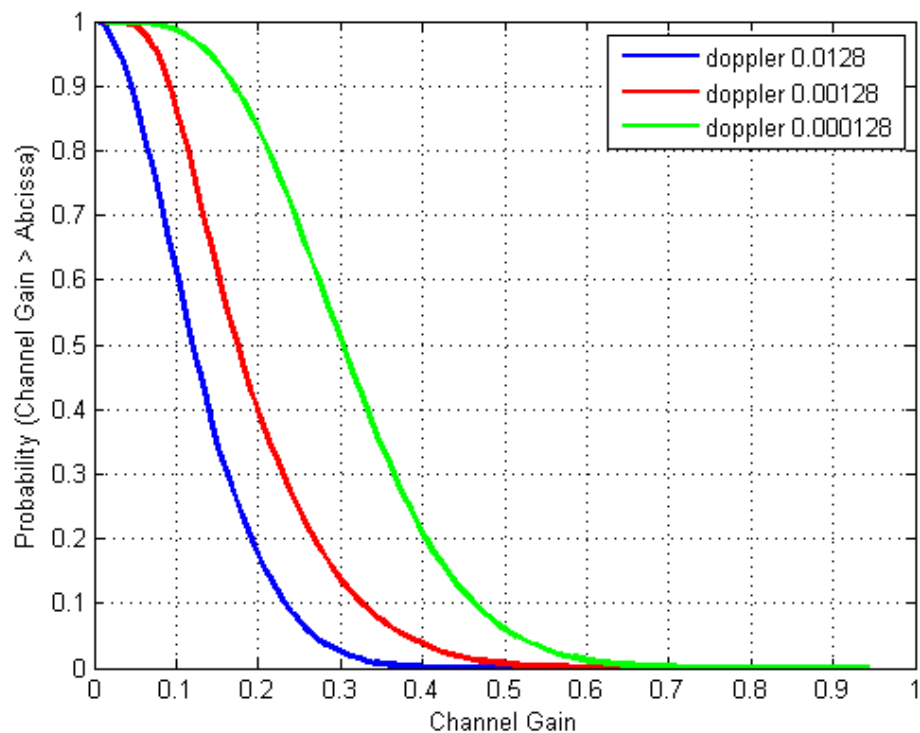
Mode Transmisi	Threshold	SNR [dB]
Adaptif 1	0.2 dan 0.4	17.1 dB
Adaptif 2	0.3 dan 0.5	18.6 dB
Adaptif 3	0.5 dan 0.7	19.4 dB

Tabel 4.10 Perbandingan Kapasitas Modulasi Adaptif dan Non-Adaptif pada kanal Frekuensi Selektif Fading dengan  $f_d = 0.0128$

Mode Transmisi	Threshold	Kapasitas Kanal
Non-Adaptif (BPSK)	-	800.000 bits
Adaptif 1	0.2 dan 0.4	1.310.362 bits
Adaptif 2	0.3 dan 0.5	1.008.858 bits
Adaptif 3	0.5 dan 0.7	816.504 bits

#### 4.4 Grafik CCDF dengan Variasi Doppler

Pada Gambar 4.10 menunjukkan grafik CCDF dari gain kanal yang divariasikan dengan tiga frekuensi Doppler normalisasi yang berbeda-beda yaitu 0.000128, 0.00128, dan 0.0128 di mana dalam standar IEEE 802.11p frekuensi kerja yang digunakan adalah 5.9 Ghz. Sehingga hal itu sesuai dengan pergeseran Doppler sesuai dengan kecepatan kendaraan yang digunakan dilingkungan VANET yaitu 1 m/s , 10 m/s, dan 100 m/s. Hasil CCDF yang disimulasikan tersebut menunjukkan probabilitas gain kanal dari sistem adaptif.



Gambar 4.10 Grafik CCDF dengan Variasi Frekuensi Doppler Normalisasi

Jika kecepatan semakin besar maka probabilitas CCDF gain kanal semakin kecil, hal itu menunjukkan kondisi kanal yang semakin buruk. Sehingga dapat mempengaruhi daya sinyal yang dikirim karena terkena pengaruh fading yang dapat menyebabkan pelemahan sinyal di penerima. Oleh karena itu, modulasi adaptif dibutuhkan dalam sistem ini untuk mengatasi masalah tersebut agar sinyal yang dikirim dapat disesuaikan dengan kondisi kanalnya. Misal modulasi dengan orde tinggi membutuhkan daya yang lebih besar ketika mentransmisikan data. Namun,

konsekuensinya yaitu dengan modulasi tinggi maka akan menyebabkan kemungkinan peluang kesalahan bit di penerima bertambah besar jika kondisi kanalnya bertambah buruk. Maka ketika hal itu terjadi, yang dapat dilakukan adalah menurunkan orde modulasinya sehingga peluang kesalahan bit di penerima dapat diperkecil. Oleh karena itu, pada kanal frekuensi selektif fading membutuhkan modulasi adaptif di lingkungan VANET.

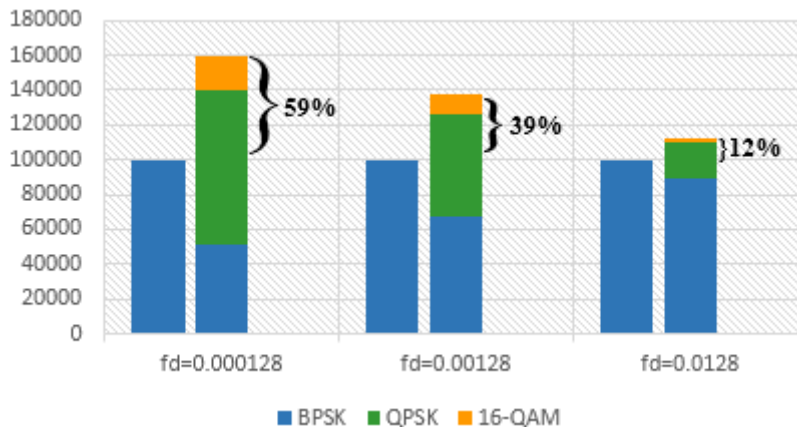
Namun, implementasi dari modulasi adaptif ini juga perlu memperhatikan grafik CCDF dari kondisi kanalnya untuk menentukan *threshold* yang tepat sehingga tetap bisa mempertahankan nilai BER yang diinginkan. Pada Gambar 4.11 merupakan hasil dari simulasi sistem dengan variasi Doppler menggunakan *threshold* 0.3 dan 0.5. Penggunaan modulasi BPSK, QPSK, dan 16-QAM yang paling efektif terjadi pada Doppler rendah yaitu  $f_d = 0.000128$  karena ketiga modulasi tersebut dapat digunakan secara menyeluruh dan mengalami peningkatan kapasitas yang cukup besar dibandingkan dengan modulasi non-adaptif (BPSK). Ketika ketiga modulasi tersebut dapat digunakan secara optimal maka sistem OFDM pada kanal frekuensi selektif fading ini dapat mempertahankan nilai BER yang diinginkan. Namun, semakin besar frekuensi Dopplernya maka kondisi kanalnya akan semakin buruk sehingga pada Doppler cepat yaitu frekuensi 0.0128 hampir semua bit dikirimkan dengan modulasi BPSK sehingga tidak mengalami peningkatan kapasitas yang signifikan. Hal itu menunjukkan jika kondisi kanal buruk karena pengaruh Doppler yang besar maka penggunaan modulasi adaptif dengan *threshold* 0.3 dan 0.5 perlu dipertimbangkan kembali untuk menghindari kemungkinan peningkatan kesalahan bit dalam sistem adaptif .

Selain itu, jika hasil simulasi kondisi gain kanal yang didapatkan pada *threshold* sebelumnya kemudian diimplementasikan pada *threshold* yang lain yaitu seperti 0.2 dan 0.4 serta 0.5 dan 0.7 maka akan didapatkan hasil kapasitas yang terlihat pada Gambar 4.14 dan Gambar 4.13. Kedua gambar tersebut menunjukkan alokasi dari penggunaan modulasi BPSK, QPSK, dan 16-QAM ketika diimplementasikan dalam modulasi adaptif dengan variasi Doppler.

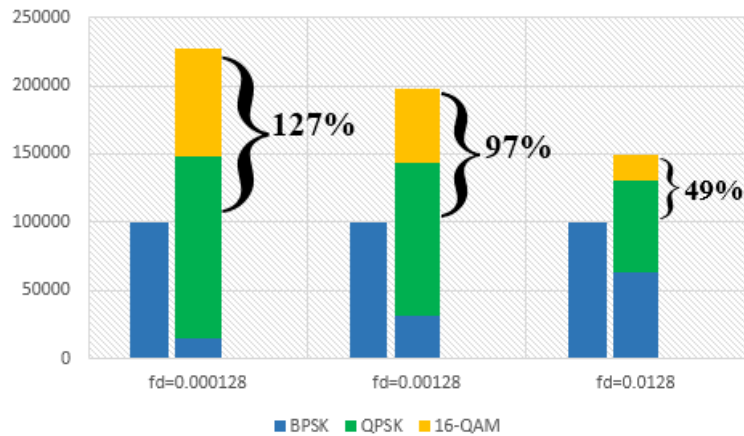
Pada Gambar 4.14 menunjukkan bahwa kapasitas sistem adaptif untuk *threshold* 0.2 dan 0.4 mengalami peningkatan yang signifikan pada  $f_d = 0.000128$  jika dibandingkan dengan modulasi non-adaptif (BPSK). Skema adaptif yang

digunakan untuk mentransmisikan data didominasi oleh modulasi QPSK sehingga data yang dikirimkan lebih banyak karena 1 simbol membawa 2 bit informasi. Hal itu berlaku pula untuk kedua kondisi lainnya dengan frekuensi Doppler normalisasi yang berbeda. Peningkatan kapasitas pada kondisi  $f_d = 0.00128$  sebesar 97% dan pada  $f_d = 0.0128$  sebesar 49% dibandingkan dengan modulasi non-adaptif (BPSK). Namun, kondisi yang berbeda terjadi pada *threshold* 0.5 dan 0.7. Hasil simulasi yang didapatkan menunjukkan peningkatan kapasitas yang tidak terlalu besar untuk ketiga kondisi frekuensi Doppler yang berbeda. Peningkatan kapasitas yang terjadi pada kondisi pertama,  $f_d = 0.000128$ , meningkat sebesar 5% sedangkan pada kondisi kedua,  $f_d = 0.00128$ , meningkat sebesar 4% dan kondisi ketiga,  $f_d = 0.0128$ , meningkat hanya sebesar 1%.

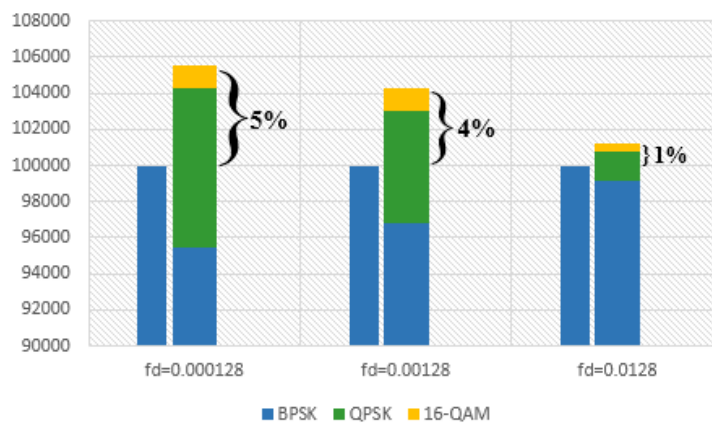
Berdasarkan hasil dari kapasitas modulasi adaptif dengan variasi *threshold* pada kondisi Doppler yang berbeda-beda, maka bisa dilihat bahwa penggunaan modulasi mampu meningkatkan kapasitas sistem jika dibandingkan dengan modulasi non-adaptif (BPSK). Namun, kemampuan adaptif dalam sistem yang digunakan untuk meningkatkan kapasitas tersebut berbeda-beda tergantung dari pemilihan *threshold* yang tepat. Pemilihan *threshold* yang tepat bisa didapatkan dari melihat grafik CCDF pada kondisi kanal saat itu. Selain itu, variasi dari efek Doppler yang disimulasikan pada modulasi adaptif memberikan pengaruh terhadap kondisi kanal. Semakin besar nilai frekuensi Doppler normalisasi yang digunakan maka kondisi kanal semakin buruk. Sehingga kapasitas sistem tidak mengalami peningkatan yang signifikan ketika efek Doppler pada  $f_d = 0.0128$  diimplementasikan karena sebagian besar data yang ditransmisikan menggunakan modulasi BPSK. Namun, pada *threshold* 0.2 dan 0.4 kondisi itu tidak berlaku karena dengan *threshold* itu modulasi adaptif pada  $f_d = 0.0128$  tetap memberikan peningkatan kapasitas yang cukup besar. Oleh karena itu, pemilihan *threshold* 0.2 dan 0.4 bisa dipertimbangkan sebagai parameter yang digunakan ketika mensimulasikan modulasi adaptif dengan kondisi frekuensi Doppler yang berbeda-beda, mengingat jika menggunakan lingkungan VANET kondisi kanalnya sangat dinamis sehingga dapat berubah sewaktu-waktu.



Gambar 4.11 Variasi Doppler pada Kapasitas Modulasi Adaptif dengan *Threshold* 0.3 dan 0.5



Gambar 4.12 Variasi Doppler pada Kapasitas Modulasi Adaptif dengan *Threshold* 0.2 dan 0.4

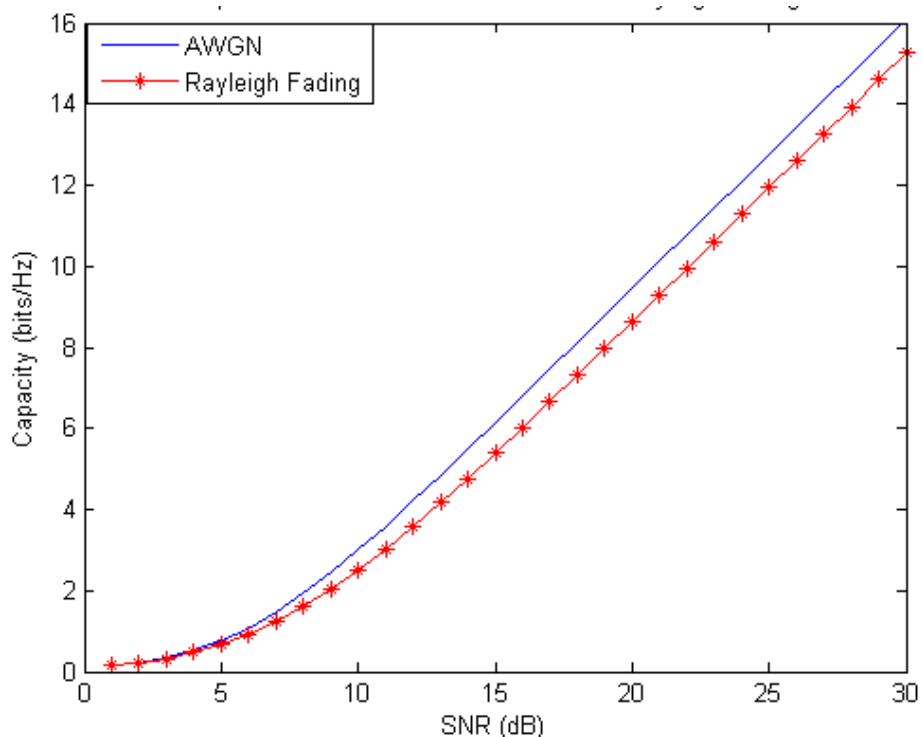


Gambar 4.13 Variasi Doppler pada Kapasitas Modulasi Adaptif dengan *Threshold* 0.5 dan 0.7



#### 4.5 Kapasitas Kanal

Kapasitas kanal adalah salah satu parameter kinerja dari kanal wireless. Kapasitas kanal merupakan banyaknya informasi yang bisa dilewatkan dalam sebuah kanal frekuensi, mempunyai satuan bit per detik per Hertz (bps/ Hz). Hasil dari perbandingan antara kapasitas kanal pada AWGN dan kapasitas *ergodic* pada kanal Rayleigh fading dengan CSI ditunjukkan pada Gambar 4.14. Kapasitas kanal meningkat secara logaritmis dengan nilai SNR. Dari gambar tersebut dapat diamati bahwa kapasitas Rayleigh fading menunjukkan kinerja yang sedikit lebih rendah daripada kapasitas untuk kanal AWGN. Hal itu terjadi karena pengaruh fading yang terjadi pada kanal Rayleigh. Perbedaan antara kedua kurva tersebut yaitu sebesar 1.5 dB. Semakin besar kapasitas suatu kanal maka sistem semakin baik karena banyak informasi yang dilewatkan dalam sebuah kanal frekuensi. Sedangkan pada kanal AWGN tidak ada pengaruh fading pada sistem komunikasi maka informasi yang dilewatkan pun lebih banyak jika dibandingkan dengan kanal Rayleigh fading.



Gambar 4.14 Perbandingan Kapasitas Kanal AWGN dan Rayleigh Fading

#### 4.6 Uji Kinerja Sistem Modulasi Adaptif dengan Channel Coding pada Kanal Frekuensi Selektif Fading

Pada sub bab ini menjelaskan mengenai simulasi modulasi adaptif dengan implementasi *channel coding* pada sistem OFDM. Hasil simulasi pada sub bab pertama menjelaskan mengenai perbandingan kondisi modulasi adaptif dengan *channel coding*, modulasi adaptif tanpa *channel coding*, serta modulasi non-adaptif seperti BPSK, QPSK, dan 16-QAM yang diujikan pada kanal frekuensi selektif fading dengan  $f_d = 0.000128$ . Hasil yang dilihat dari uji sistem tersebut yaitu mengenai kinerja sistem yang ditandai dengan perolehan BER serta kapasitas sistem untuk semua kondisi.

Sub bab selanjutnya akan membahas mengenai dua kondisi antara modulasi adaptif dengan *channel coding* dan modulasi adaptif tanpa *channel coding*. Kedua kondisi tersebut akan dibandingkan dengan mengaplikasikan tiga *threshold* yang sudah ditentukan sebelumnya. Hal itu bertujuan untuk melihat kemampuan adaptif sistem dalam mendapatkan nilai BER yang diinginkan. Selanjutnya, kondisi lingkungan VANET yang digunakan sebagai parameter uji kinerja sistem berdasarkan frekuensi Doppler normalisasi yaitu  $f_d = 0.000128$ ,  $f_d = 0.00128$ , dan  $f_d = 0.0128$ .

##### 4.6.1 Perbandingan Hasil Simulasi Modulasi Adaptif dengan dan Tanpa Channel Coding serta Modulasi Non-Adaptif pada Kanal Frekuensi Selektif Fading

Kurva BER perbandingan simulasi pada kanal frekuensi selektif fading pada sistem OFDM antara modulasi adaptif dengan *channel coding*, modulasi adaptif tanpa *channel coding*, serta modulasi non-adaptif seperti BPSK, QPSK, dan 16-QAM terlihat pada

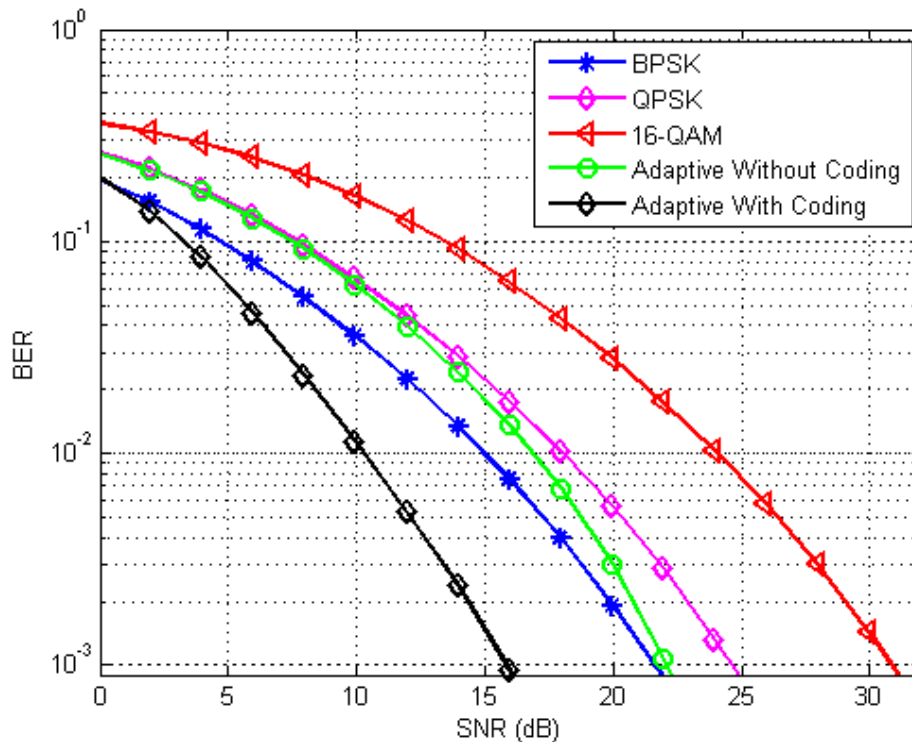
Gambar 4.15. Simulasi dilakukan pada  $f_d = 0.000128$  dan nilai SNR 70 dB. Kinerja BER yang diinginkan pada kondisi ini adalah  $10^{-3}$ . Kebutuhan SNR dari ketiga kondisi yaitu modulasi adaptif dengan *channel coding*, modulasi adaptif tanpa *channel coding*, dan modulasi non-adaptif dapat dilihat pada Tabel 4.4. Jika dilihat dari kurva gambar BER tersebut, semua modulasi dapat memenuhi target BER yang diinginkan. Modulasi adaptif dengan *channel coding* membutuhkan SNR terendah yaitu 16 dB untuk mencapai BER  $10^{-3}$ . Sedangkan modulasi 16-

QAM membutuhkan SNR tertinggi yaitu 24.5 dB untuk mencapai nilai BER yang diinginkan. Kemudian jika dilihat dari kapasitasnya, modulasi adaptif dengan dan tanpa *channel coding* mengalami peningkatan kapasitas jika dibandingkan dengan modulasi non-adaptif (BPSK). Modulasi adaptif dengan *channel coding* memberikan peningkatan kapasitas sebesar 33,35% sedangkan modulasi adaptif tanpa *channel coding* mengalami peningkatan sebesar 97,6%.

Terdapat *trade-off* yang terjadi ketika dikaitkan dengan modulasi BPSK dan 16-QAM. Jika dilihat dari modulasi 16-QAM, penjelasan pertama yaitu mengenai kondisi tersebut menunjukkan bahwa penggunaan modulasi adaptif memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan modulasi 16-QAM, hal itu karena pada modulasi orde tinggi kemungkinan terjadi kesalahan simbol pada saat pengiriman lebih besar akibat pengaruh fading. Sehingga hal itu mempengaruhi kinerja sistem yang berakibat membutuhkan daya yang lebih besar pada saat pengiriman sinyal jika dibandingkan dengan modulasi adaptif. Penjelasan yang kedua yaitu *trade-off* tersebut menunjukkan bahwa penggunaan modulasi 16-QAM memberikan kapasitas yang jauh lebih besar jika dibandingkan dengan penggunaan modulasi adaptif. Hal itu dapat dilihat pada Gambar 4.16 mengenai kondisi kapasitas sistem pada semua modulasi baik adaptif maupun non-adaptif. Pada modulasi adaptif dengan *channel coding* memperoleh kapasitas sistem sebesar 1,066,691 bits sedangkan modulasi 16-QAM memiliki kapasitas sistem terbesar yaitu sebesar 3,200,000 bits. Oleh karena itu, pada saat sinyal informasi mengimplementasikan modulasi 16-QAM untuk mengirimkan sinyal, maka 1 simbol informasi dapat mentransmisikan 4 bits. Sehingga, secara tidak langsung kapasitas sistem pada modulasi orde tinggi seperti 16-QAM tersebut mengalami peningkatan yang jauh lebih besar yaitu hampir 3 kalinya jika dibandingkan dengan modulasi adaptif implementasi *channel coding*.

Sehingga dari kedua penjelasan tersebut terdapat *trade-off* yang dapat digunakan sesuai dengan desain sistem yang diinginkan, misalnya jika menginginkan sistem dengan daya yang kecil dan peningkatan kapasitas sistem yang tidak terlalu besar maka penggunaan modulasi adaptif bisa menjadi pilihan yang tepat. Namun, jika ingin mendesain sistem dengan kecepatan data yang tinggi sehingga mampu memperoleh peningkatan kapasitas yang besar, serta desain

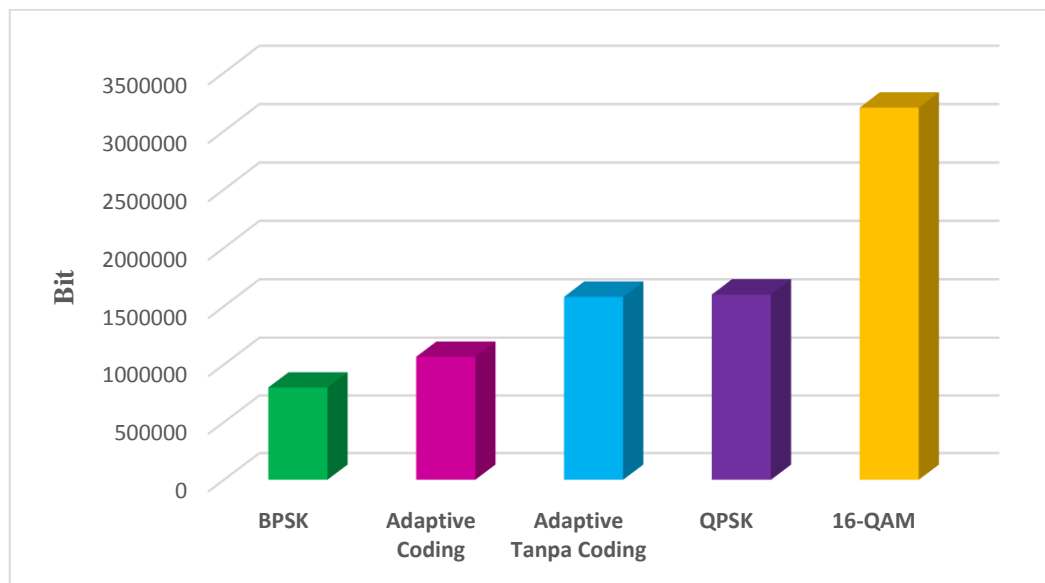
sistem yang tidak terlalu mempermasalahkan daya yang digunakan menjadi lebih besar, maka bisa mengaplikasikan modulasi 16-QAM sebagai alternatif mendesain sistem yang diinginkan. Namun penggunaan daya yang tinggi dalam sistem itu, akibatnya akan memberikan dampak pada desain sistem yang kurang ekonomis.



Gambar 4.15 Perbandingan Hasil Kinerja Modulasi Adaptif dengan dan Tanpa *Channel Coding* serta Modulasi Non-Adaptif pada Kanal Frekuensi Selektif Fading

Tabel 4.11 Perbandingan Kinerja Fix Modulasi untuk BER  $10^{-3}$  pada Kanal Frekuensi Selektif Fading

Mode Transmisi	SNR [dB]
BPSK	21.6 dB
QPSK	22 dB
16-QAM	24.5 dB
Adaptive Without Channel Coding	21.8 dB
Adaptive With Channel Coding	16 dB



Gambar 4.16 Perbandingan Kapasitas Sistem untuk Semua Modulasi pada Kanal Frekuensi Selektif Fading

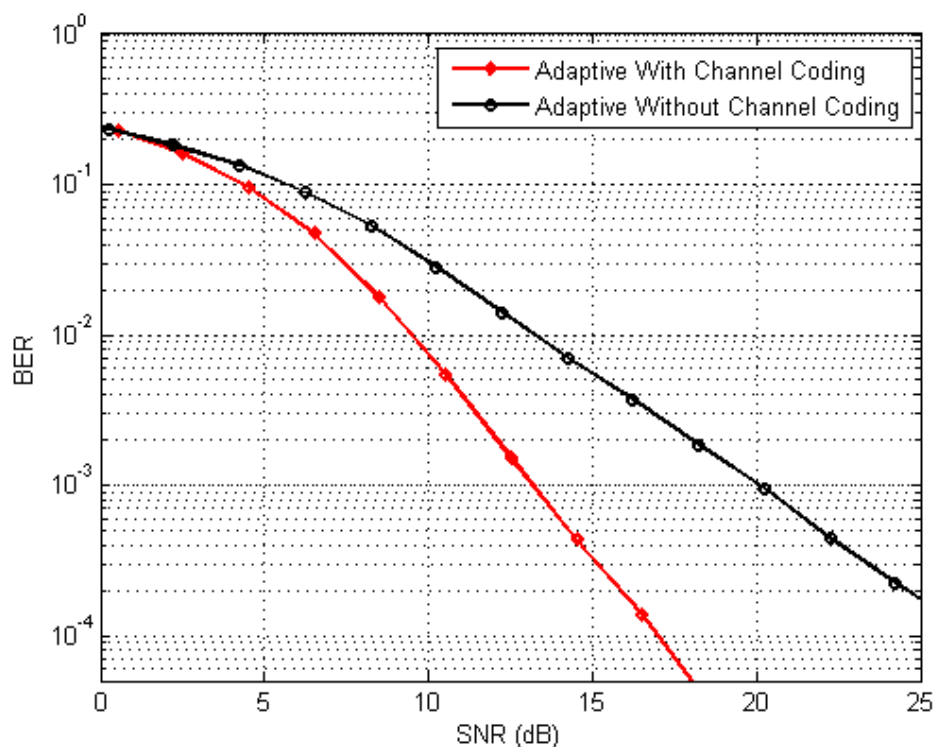
#### 4.6.2 *Threshold* Pertama (0.2 dan 0.4)

Pada Gambar 4.17 menunjukkan hasil dari simulasi modulasi adaptif yang telah diimplementasikan dengan *channel coding* pada kanal frekuensi selektif fading. Hasil pertama yang diujikan menggunakan frekuensi Doppler yang rendah yaitu  $f_d = 0.000128$  dengan nilai *threshold* 0.2 dan 0.4. BER yang diinginkan pada simulasi ini yaitu  $10^{-4}$ . Modulasi adaptif dengan *channel coding* mampu memberikan kinerja yang optimal pada  $f_d = 0.000128$  karena mampu mencapai nilai BER yang diinginkan jika dibandingkan dengan modulasi adaptif tanpa *channel coding*. Skenario yang sama juga dipilih untuk mengetahui pengaruh dari variasi frekuensi Doppler normalisasi yang lainnya.

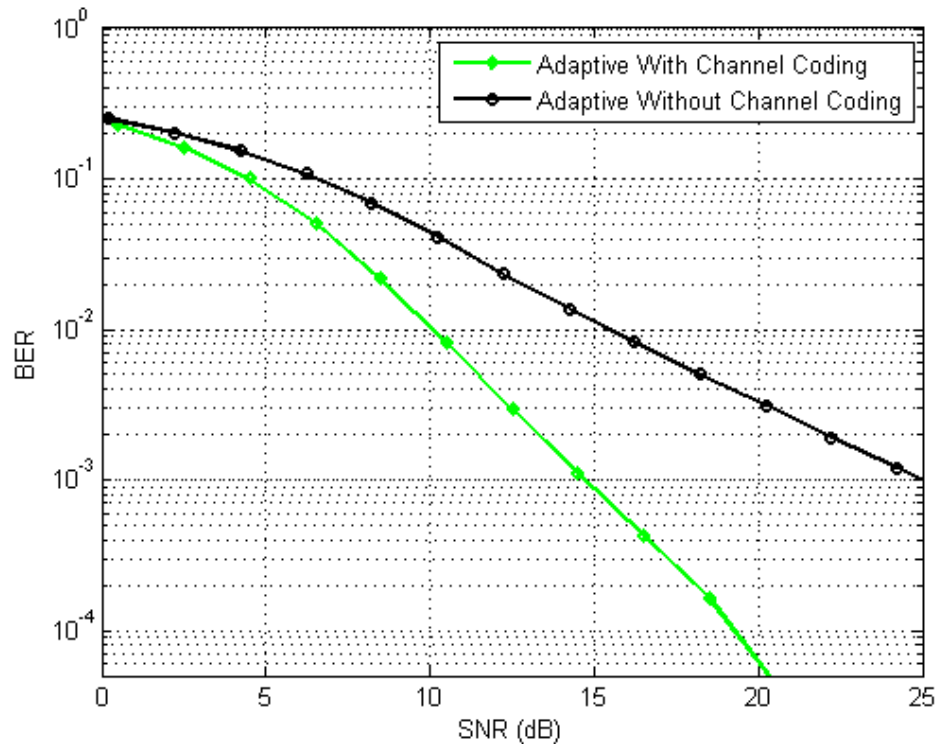
Pada Gambar 4.18 menunjukkan hasil dari simulasi modulasi adaptif pada sistem OFDM dengan *channel coding* pada kanal frekuensi selektif fading. Hasil kedua yang diujikan menggunakan frekuensi Doppler sedang atau  $f_d = 0.00128$  dengan nilai *threshold* yang tetap sama yaitu 0.2 dan 0.4. BER yang diinginkan pada simulasi untuk kondisi kedua ini yaitu  $10^{-4}$ . Dari kurva BER yang dihasilkan menunjukkan bahwa modulasi adaptif dengan *channel coding* mampu memberikan kinerja yang lebih bagus jika dibandingkan dengan modulasi adaptif tanpa *channel coding*. Nilai BER yang diinginkan sistem juga dapat dicapai oleh modulasi adaptif

dengan *channel coding* namun untuk *modulasi adaptif* tanpa *channel coding* hanya mampu mencapai nilai BER  $10^{-3}$ .

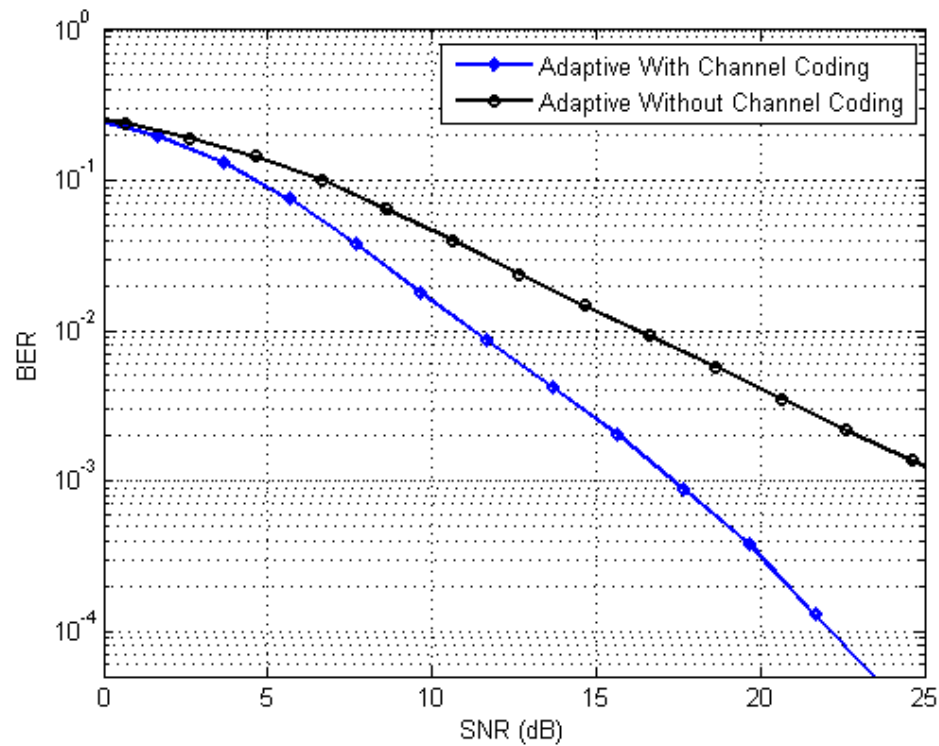
Selanjutnya, hasil dari kondisi ketiga untuk simulasi modulasi adaptif dengan *channel coding* pada sistem OFDM dengan  $f_d = 0.0128$  dapat dilihat pada Gambar 4.19. *Threshold* yang digunakan untuk menentukan kemampuan adaptif sistem juga masih sama yaitu dengan level *threshold* 0.2 dan 0.4. Parameter nilai BER yang diinginkan sistem untuk kondisi frekuensi Doppler besar atau  $f_d = 0.0128$  yaitu  $10^{-4}$ . Pengaruh kondisi kanal frekuensi selektif fading dan efek Doppler pada sistem yang lebih besar masih memberikan hasil kinerja modulasi adaptif dengan *channel coding* optimal karena mampu mencapai nilai BER yang diinginkan sistem. Kurva BER yang didapatkan pada modulasi adaptif dengan *channel coding* memberikan performa yang lebih baik jika dibandingkan dengan modulasi adaptif tanpa *channel coding*.



Gambar 4.17 Kinerja Modulasi Adaptif dengan *Channel Coding* pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan  $f_d = 0.000128$  serta *threshold* 0.2 & 0.4



Gambar 4.18 Kinerja Modulasi Adaptif dengan *Channel Coding* pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan  $f_d = 0.00128$  serta *threshold* 0.2 & 0.4



Gambar 4.19 Kinerja Modulasi Adaptif dengan *Channel Coding* pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan  $f_d = 0.0128$  serta *threshold* 0.2 & 0.4

Jadi, jika dilihat dari ketiga variasi kondisi frekuensi Doppler dengan *threshold* sama yaitu 0.2 dan 0.4, maka modulasi adaptif dengan implementasi *channel coding* menunjukkan kinerja yang lebih baik jika dibandingkan dengan modulasi adaptif tanpa *channel coding*. Hal itu bisa ditunjukkan dengan kurva BER yang didapatkan pada masing-masing kondisi. Selain itu, kebutuhan SNR untuk setiap kondisi ketika mencapai BER yang diinginkan yaitu  $10^{-4}$  dapat dilihat pada Tabel 4.12. Kondisi modulasi adaptif tanpa *channel coding* tidak mampu mencapai nilai BER yang diinginkan untuk semua variasi Doppler yang telah disimulasikan. Kebutuhan SNR terendah dicapai oleh modulasi adaptif dengan frekuensi Doppler terendah yaitu 17 dB untuk mendapatkan nilai BER  $10^{-4}$  sedangkan SNR tertinggi yaitu 22.1 dB digunakan untuk mensimulasikan frekuensi Doppler tertinggi.

Tabel 4.12 Kinerja Modulasi Adaptif dengan Channel Coding untuk BER  $10^{-4}$  pada Kanal Frekuensi Selektif Fading di *threshold* 0.2 dan 0.4

Mode Transmisi dengan Channel Coding	SNR [dB]
Adaptif - $f_d = 0.000128$	17 dB
Adaptif - $f_d = 0.00128$	19.3 dB
Adaptif - $f_d = 0.0128$	22.1 dB

#### 4.6.3 Threshold Kedua (0.3 dan 0.5)

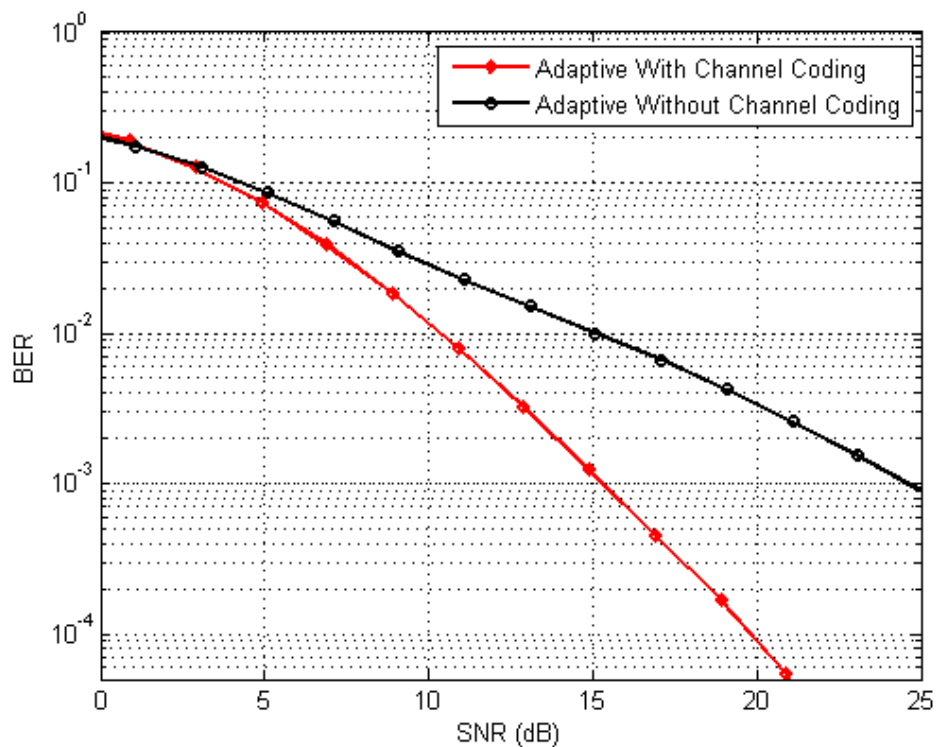
Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai simulasi dari modulasi adaptif pada sistem OFDM dengan implementasi *channel coding*. Seperti halnya penjelasan sebelumnya yaitu uji sistem dilakukan untuk ketiga variasi frekuensi Doppler dengan nilai BER yang diinginkan yaitu  $10^{-4}$ . Namun, *threshold* yang digunakan untuk mengetahui sistem adaptifnya berbeda yaitu menggunakan *threshold* 0.3 dan 0.5.

Hasil dari simulasi modulasi adaptif yang didapatkan untuk kondisi pertama yaitu menggunakan  $f_d = 0.000128$  dapat dilihat pada Gambar 4.20. Menurut gambar kurva BER dari kedua skenario tersebut terlihat bahwa kurva BER dengan *channel coding* mampu memberikan kinerja yang lebih baik karena dapat mencapai nilai BER yang diinginkan dibandingkan dengan modulasi adaptif tanpa *channel coding*.

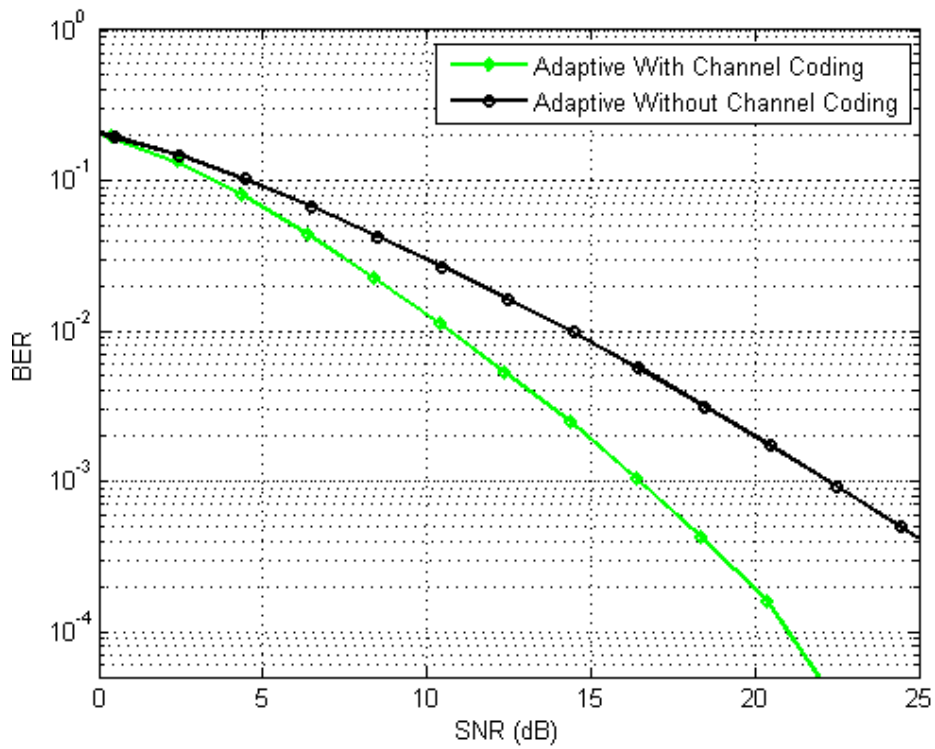


Selanjutnya, hasil dari simulasi modulasi adaptif pada sistem OFDM untuk kondisi kedua yaitu menggunakan  $f_d = 0.00128$  dapat dilihat pada Gambar 4.21. Menurut gambar kurva BER dari kedua skenario tersebut terlihat bahwa kurva BER dengan *channel coding* mampu memberikan kinerja yang lebih baik karena dapat mencapai nilai BER yang diinginkan jika dibandingkan dengan modulasi adaptif tanpa *channel coding*.

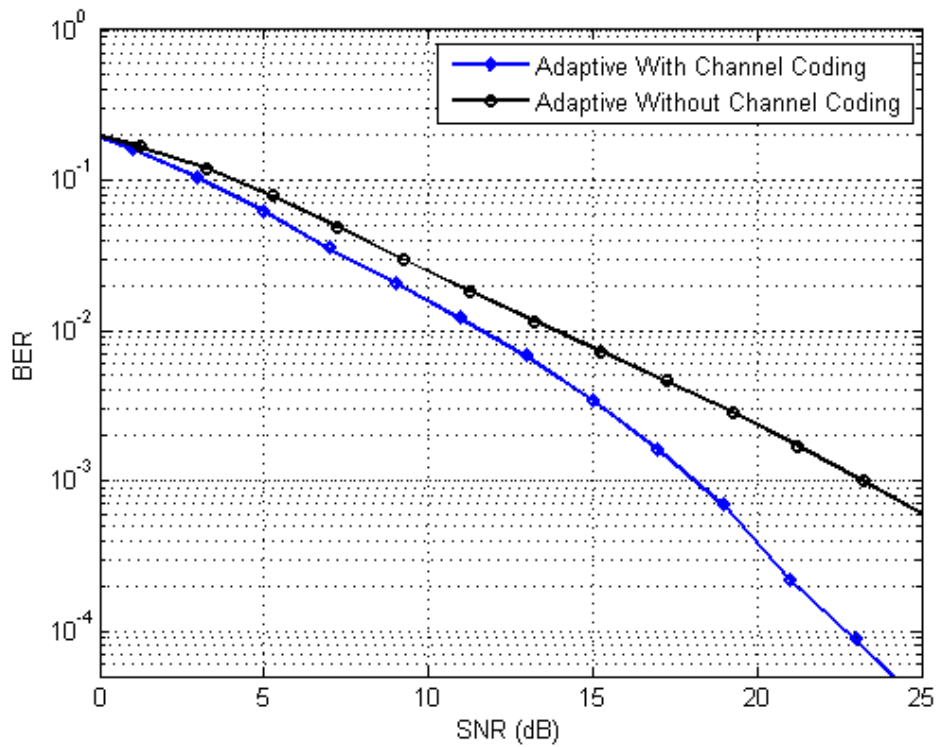
Terakhir, hasil dari simulasi modulasi adaptif pada sistem OFDM untuk kondisi ketiga yaitu menggunakan  $f_d = 0.0128$  dapat dilihat pada Gambar 4.22. Menurut gambar kurva BER dari kedua skenario tersebut terlihat bahwa kurva BER dengan *channel coding* juga mampu memberikan kinerja yang lebih baik karena dapat mencapai nilai BER yang diinginkan jika dibandingkan dengan modulasi adaptif tanpa *channel coding*.



Gambar 4.20 Kinerja Modulasi Adaptif dengan *Channel Coding* pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan  $f_d = 0.000128$  serta *threshold* 0.3 & 0.5



Gambar 4.21 Kinerja Modulasi Adaptif dengan *Channel Coding* pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan  $f_d = 0.00128$  serta *threshold* 0.3 & 0.5



Gambar 4.22 Kinerja Modulasi Adaptif dengan *Channel Coding* pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan  $f_d = 0.0128$  serta *threshold* 0.3 & 0.5

Jadi, hasil simulasi untuk semua kondisi frekuensi Doppler menggunakan *threshold* 0.3 dan 0.5 menunjukkan bahwa modulasi adaptif dengan *channel coding* memberikan kinerja yang lebih baik jika dibandingkan dengan modulasi adaptif tanpa *channel coding*. Kebutuhan SNR untuk mencapai BER  $10^{-4}$  bisa dilihat pada Tabel 4.13. SNR terendah untuk mendapatkan nilai BER yang diinginkan terjadi pada saat frekuensi Doppler rendah atau  $f_d = 0.000128$  yaitu sebesar 19.8 dB, sedangkan modulasi adaptif dengan  $f_d = 0.00128$  membutuhkan SNR sebesar 20.9 dB, dan modulasi adaptif dengan  $f_d = 0.0128$  membutuhkan SNR sebesar 22.8 dB.

Tabel 4.13 Kinerja Modulasi Adaptif dengan Channel Coding untuk BER  $10^{-4}$  pada Kanal Frekuensi Selektif Fading di *threshold* 0.3 dan 0.5

Mode Transmisi dengan Channel Coding	SNR [dB]
Adaptif $-f_d = 0.000128$	19.8 dB
Adaptif $-f_d = 0.00128$	20.9 dB
Adaptif $-f_d = 0.0128$	22.8 dB

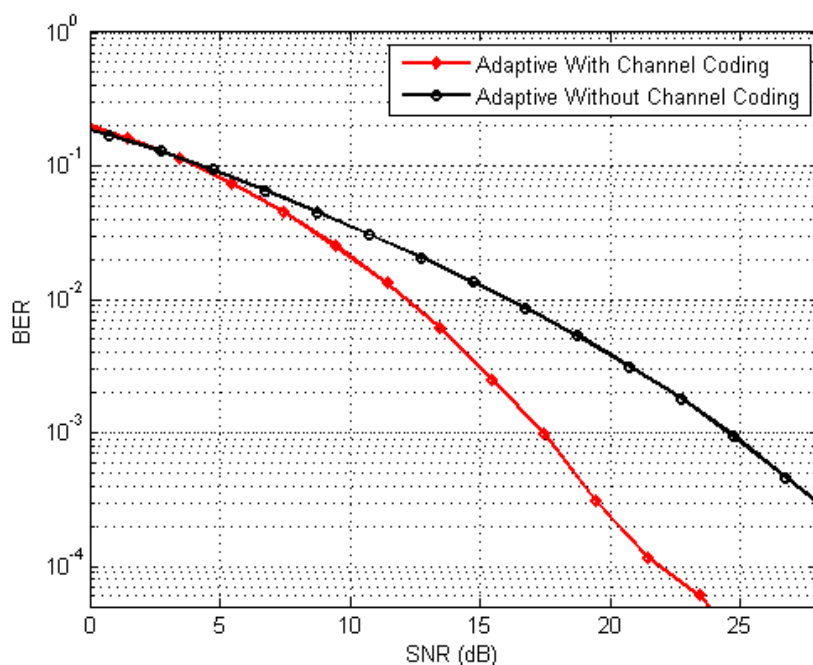
#### 4.6.4 Threshold Ketiga (0.5 dan 0.7)

Pada sub bab ini juga dijelaskan mengenai parameter dan skenario yang sama hanya saja *threshold* yang digunakan berbeda yaitu menggunakan *threshold* 0.5 dan 0.7. Hasil dari simulasi modulasi adaptif dengan dan tanpa *channel coding* pada sistem OFDM untuk kondisi pertama yaitu menggunakan  $f_d = 0.000128$  dapat dilihat pada Gambar 4.23Gambar 4.22. Menurut gambar kurva BER dari kedua skenario tersebut terlihat bahwa kurva BER dengan *channel coding* mampu memberikan kinerja yang lebih baik karena dapat mencapai nilai BER yang diinginkan jika dibandingkan dengan modulasi adaptif tanpa *channel coding*.

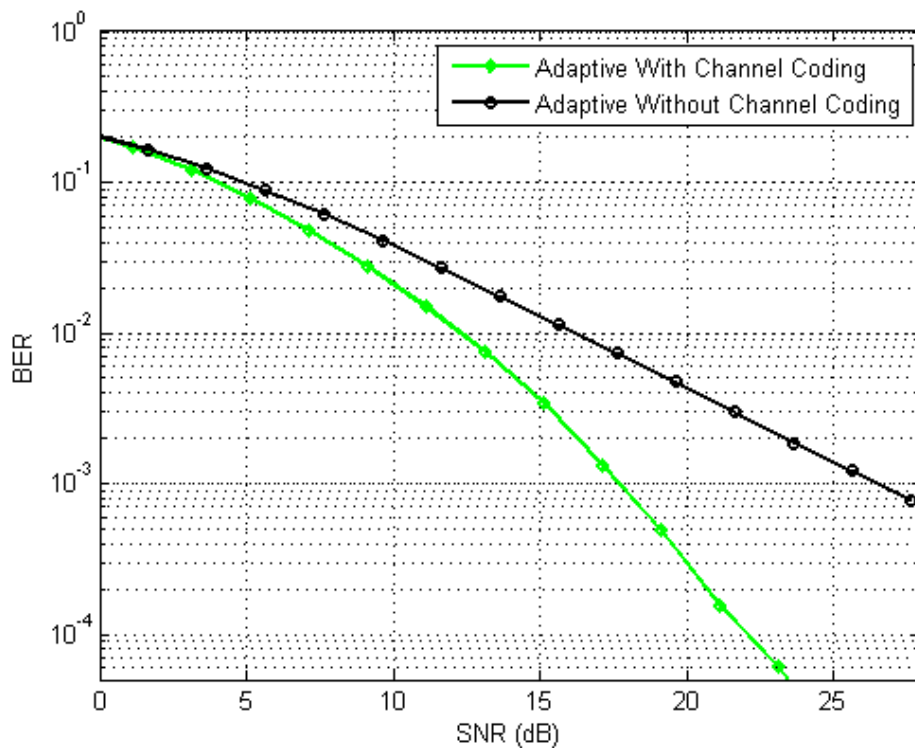
Selanjutnya, hasil dari simulasi modulasi adaptif dengan *channel coding* pada sistem OFDM untuk kondisi kedua yaitu menggunakan  $f_d = 0.00128$  dapat dilihat pada Gambar 4.24Gambar 4.22. Menurut gambar kurva BER dari kedua skenario tersebut terlihat bahwa kurva BER dengan *channel coding* mampu memberikan kinerja yang lebih baik karena dapat mencapai nilai BER yang diinginkan jika dibandingkan dengan modulasi adaptif tanpa *channel coding*.

Terakhir, hasil dari simulasi modulasi adaptif dengan *channel coding* pada sistem OFDM untuk kondisi ketiga yaitu menggunakan  $f_d = 0.0128$  dapat dilihat pada Gambar 4.25. Menurut gambar kurva BER dari kedua skenario tersebut terlihat bahwa kurva BER dengan *channel coding* mampu memberikan kinerja yang lebih baik karena dapat mencapai nilai BER yang diinginkan jika dibandingkan dengan modulasi adaptif tanpa *channel coding*.

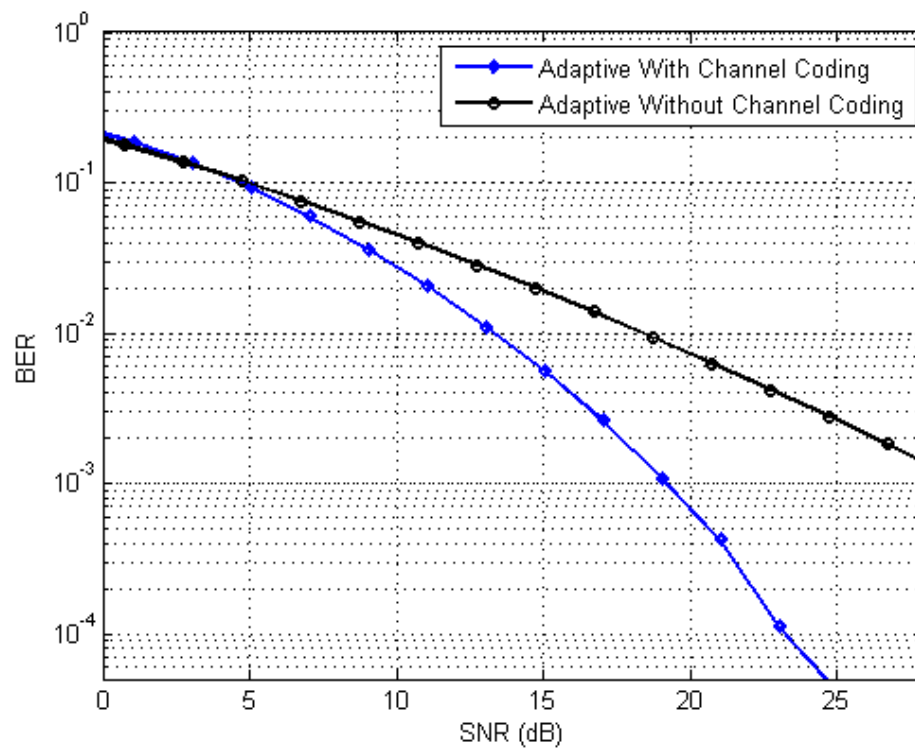
Jadi, hasil simulasi untuk semua kondisi frekuensi Doppler menggunakan *threshold* 0.5 dan 0.7 memberikan hasil bahwa modulasi adaptif dengan *channel coding* mempunyai kinerja yang lebih baik jika dibandingkan dengan modulasi adaptif tanpa *channel coding*. Kebutuhan SNR untuk mencapai BER  $10^{-4}$  bisa dilihat pada Tabel 4.13. SNR terendah untuk mendapatkan nilai BER yang diinginkan terjadi pada saat frekuensi Doppler rendah atau  $f_d = 0.000128$  yaitu sebesar 21.8 dB, sedangkan modulasi adaptif dengan  $f_d = 0.00128$  membutuhkan SNR sebesar 22.1 dB, dan modulasi adaptif dengan  $f_d = 0.0128$  membutuhkan SNR sebesar 23.3 dB.



Gambar 4.23 Kinerja Modulasi Adaptif dengan *Channel Coding* pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan  $f_d = 0.0128$  serta *threshold* 0.5 & 0.7



Gambar 4.24 Kinerja Modulasi Adaptif dengan *Channel Coding* pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan  $f_d = 0.0128$  serta *threshold* 0.5 & 0.7



Gambar 4.25 Kinerja Modulasi Adaptif dengan *Channel Coding* pada Kanal Frekuensi Selektif Fading dengan  $f_d = 0.0128$  serta *threshold* 0.5 & 0.7

Tabel 4.14 Kinerja Modulasi Adaptif dengan Channel Coding untuk BER  $10^{-4}$  pada Kanal Frekuensi Selektif Fading di *threshold* 0.5 dan 0.7

Mode Transmisi dengan Channel Coding	SNR [dB]
Adaptif $-f_d = 0.000128$	21.8 dB
Adaptif $-f_d = 0.00128$	22.1 dB
Adaptif $-f_d = 0.0128$	23.3 dB

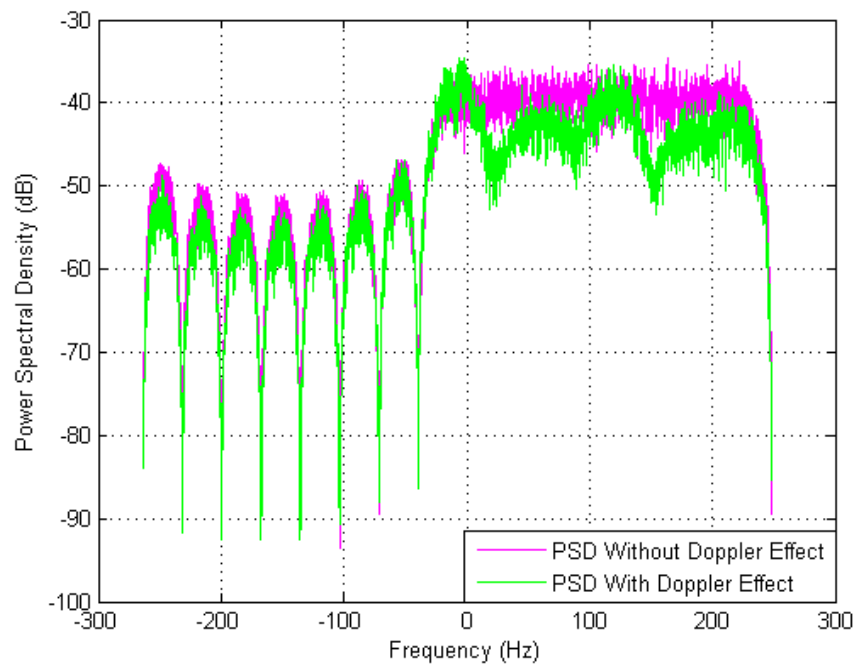
Dari ketiga *threshold* yang sudah diaplikasikan pada sub bab sebelumnya, terlihat bahwa implementasi *channel coding* mampu memberikan kinerja yang lebih baik pada sistem modulasi adaptif karena *channel coding* berfungsi untuk menjaga informasi atau data digital dari *error* yang mungkin terjadi selama proses transmisi dengan cara menambahkan *bit parity* (bit redundansi) ke dalam bit yang akan dikirimkan. Sehingga, pengaruh implementasi channel coding pada modulasi adaptif dapat mengurangi kesalahan bit pada penerima dengan kondisi frekuensi Doppler yang berbeda-beda. Hal itu dapat dilihat dari hasil yang telah disimulasikan menunjukkan bahwa kurva BER antara modulasi adaptif dengan *channel coding* memberikan kinerja lebih bagus dibandingkan dengan modulasi adaptif tanpa *channel coding* seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya.

#### 4.7 Spektrum Power Spectral Density

*Power Spectral Density* atau yang biasa disingkat dengan PSD merupakan besar daya dalam interval frekuensi. Perhitungan PSD pada MATLAB menggunakan metode Welch (Krauss *et.al* 1995), yakni mencari DFT (berdasarkan perhitungan dengan algoritma FFT), kemudian mengkuadratkan nilai magnitude tersebut. Berikut adalah hasil pengolahan data yang dijalankan dengan menggunakan *syntax* MATLAB dan kemudian diilustrasikan pada Gambar 4.26.

Analisis hasil simulasi dari gambar tersebut adalah membandingkan antara PSD dengan pengaruh efek Doppler dan PSD tanpa pengaruh efek Doppler. Gambar dari PSD yang terkena efek pergeseran frekuensi Doppler menunjukkan bahwa spektrum PSD memiliki main lobe yang bergelombang. Hal itu terjadi karena terkena efek kanal *Rayleigh* dan noise pada sinyal OFDM yang dibangkitkan. Sedangkan jika melihat PSD tanpa pengaruh efek Doppler

menunjukkan bahwa spektrum dengan main dan side lobe lebih stabil dan tidak mengalami kerusakan. Itu menandakan bahwa spektrum yang disimulasikan tidak mengalami noise atau fading dari pergeseran frekuensi Doppler.



Gambar 4.26 Perbandingan hasil PSD dengan dan tanpa Efek Doppler

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## BAB 5

### KESIMPULAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis penelitian yang sudah dilakukan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Penggunaan *channel coding* pada modulasi adaptif menurunkan tingkat kesalahan bit sehingga kinerja BER yang didapatkan lebih bagus artinya terjadi penurunan BER yang semakin linier seiring dengan meningkatnya nilai SNR.
2. Implementasi modulasi adaptif dalam lingkungan VANET berguna untuk meningkatkan kapasitas kanal sistem karena sifat modulasi adaptif yang dapat menyesuaikan dengan sifat kanalnya yang dinamis.
3. Pada modulasi adaptif menunjukkan hasil SNR lebih rendah jika dibandingkan dengan modulasi non-adaptif (16-QAM) untuk mencapai nilai BER yang diinginkan. Semakin besar orde modulasi maka data yang dikirimkan semakin banyak namun konsekuensinya peluang terjadi kesalahan bit informasi menjadi lebih besar jika kondisi kanal semakin buruk akibat gangguan fading.
4. Pemilihan *threshold* 0.2 dan 0.4 dalam implementasi pada modulasi adaptif ini menunjukkan kinerja paling optimal karena dapat meningkatkan kapasitas sistem paling besar dan kinerja BER terendah jika dibandingkan dengan kedua *threshold* lainnya dalam kondisi frekuensi Doppler yang berbeda-beda.
5. Perbedaan antara kurva kapasitas sistem pada kanal AWGN sebesar 1.5 dB lebih besar jika dibandingkan dengan kanal Rayleigh. Hal itu terjadi karena pada kanal AWGN informasi yang dilewatkan lebih banyak karena gangguan yang terjadi hanya noise pada sistem tersebut.
6. Terdapat *trade off* antara modulasi adaptif dengan modulasi non-adaptif seperti BPSK atau 16-QAM yaitu antara mendapatkan kinerja BER yang optimal atau meningkatkan kapasitas sistem. Sehingga, hal itu tergantung dari kebutuhan suatu sistem yang ingin didesain.
7. Semakin besar frekuensi Doppler yang diimplementasikan pada sistem maka semakin besar daya yang dibutuhkan untuk mencapai BER yang diinginkan.

Sehingga konsekuensinya yaitu desain sistem menjadi lebih mahal karena membutuhkan daya yang lebih besar untuk memancarkan sinyal.

## 5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan yang sudah disebutkan, saran yang dapat diberikan penulis untuk pengembangan penelitian lebih lanjut antara lain sebagai berikut :

1. Terkait dengan penelitian selanjutnya, model OFDM bisa dikembangkan lebih lanjut dengan menggunakan sistem MIMO dengan dua antena atau lebih agar ketika terjadi *multipath* penerima dapat memilih informasi data yang diambil melalui teknik *diversity*.
2. Skenario uji sistem selanjutnya dapat dilakukan pada model kanal atau implementasi *error control* lain agar dapat mengetahui kemampuan adaptif suatu sistem tersebut dalam lingkungan VANET sehingga nantinya dapat dibandingkan dengan yang sudah diujikan saat ini.
3. Implementasi model adaptif pada sistem OFDM dilingkungan VANET dengan frekuensi normalisasi Doppler cepat,  $f_d = 0.0128$ , sepertinya perlu dipertimbangan lagi karena pada simulasi menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas kanal tidak terlalu signifikan dengan tiga variasi *threshold* yang sudah diujikan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Cooper, D. Franklin, M. Ros, F. Safaei, and M. Abolhasan, "A Comparative Survey of VANET Clustering Techniques," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 657–681, 2017.
- [2] H. Yeh, S. Member, S. Yıldız, and S. Member, "Space – Time Trellis-Coded OFDM Systems in Frequency-Selective Mobile Fading Channels," *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 64, no. 6, pp. 660–664, 2017.
- [3] W. M. Hadiansyah, T. Suryani, and G. Hendrantoro, "Doppler Spread Estimation for OFDM Systems Using Phase Difference Method in Rayleigh Fading Channels," *7th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications*, pp. 147–152, 2012.
- [4] L. Khalid and A. Anpalagan, "Performance Analysis of a *Threshold*-based Group-adaptive Modulation Scheme with Adaptive Subcarrier Allocation in OFCDM Systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 7, pp. 2463–2467, 2008.
- [5] T. Harivikram and R. Harikumar, "Adaptive Modulation and Coding Rate for OFDM Systems," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 3–8, 2013.
- [6] M. Torabi, "Adaptive modulation for space-frequency block coded OFDM systems," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 62, no. 7, pp. 521–533, 2008.
- [7] P. S. Chow, J. M. Cioffi, and J. A. C. Bingham, "A Practical Discrete Multitone Transceiver Loading Algorithm for Data Transmission over Spectrally Shaped Channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, no. 2, pp. 773–775, 1995.
- [8] A. Czylik, "Adaptive OFDM for Wideband Radio Channels," *Proc. IEEE GLOBECOM'96*, no. 5, pp. 713–718, 1996.
- [9] J. Faezah and K. Sabira, "Adaptive Modulation for OFDM Systems," *International Journal of Communication Networks and Information Security*, vol. 1, no. 2, pp. 1–8, 2009.
- [10] C. College and R. Korea, "Doppler Effect on V2I Path Loss and V2V Channel Models," *International Conference on Information and Communication Convergence*, no. 1, pp. 898–902, 2016.
- [11] C. S. Choi, Y. Shoji, and H. Ogawa, "Implementation of an OFDM baseband with adaptive modulations to grouped subcarriers for millimeter-wave wireless indoor networks," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 57, no. 4, pp. 1541–1549, 2011.
- [12] C. F. Mecklenbr, "Implementation of IEEE 802 . 11p Physical Layer Model in SIMULINK." Master's thesis, Vienna University of Technology Institute

of Communication and Radio-Frequency Engineering, 2010.

- [13] K. Fazel, S. Kaiser, *Multi-carrier and Spread Spectrum*. 2006. p. 21-22
- [14] K. Albarazi, U. Mohammad, and N. Al-holou, "Doppler Shift Impact On Vehicular Ad-hoc Networks," *Canadian Journal on Multimedia and Wireless Networks*, vol. 2, no. 3, 2011.
- [15] A. M. S. Abdelgader and W. Lenan, "The Physical Layer of the IEEE 802 . 11p WAVE Communication Standard : The Specifications and Challenges," *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science.*, vol. II, pp. 22–24, 2014.
- [16] P. Örmeci, "Adaptive Coded Modulation Schemes for Fading Channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 5, pp. 595–602, 2000.
- [17] E. A. Feukeu, K. Djouani, and A. Kurien, "An MCS adaptation technique for Doppler Effect in IEEE 802.11p Vehicular networks," *Procedia Computer Science.*, vol.19, no. Ant, pp. 570-577, 2013.
- [18] D. Frequency, B.M. Channel, and C. Science, "The Effects of Modulation Combination, Target BER, Doppler Frequency, and Adaptation Interval on The Performance of Adaptive OFDM in Broadaband Mobile Channel," 2002.
- [19] F. Dressler, C. Sommer, D. Eckhoff, and O. K. Tonguz, "Models, Techniques, and Pitfalls," no. SEPTEMBER 2011, pp. 43–51.
- [20] D. Denteneer, X. P. Costa, and N. E. C. L. Europe, "The IEEE 802.11 Universe," no. January, pp. 62–70, 2010.
- [21] Cho, Yong Soo, Jaekwon Kim, Won Young Yang, Chung-Gu Kang, MIMO OFDM Wireless Communication with MATLAB. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, Singapore, 2010.
- [22] Lin, D.J. Constello, Error Control Coding : Fundamental and Applications, Prentice Hall, 1983.
- [23] Sklar, Bernard. "Digital Communications Fundamentals and Application Pretince Hall. California. 2001.
- [24] Wicker, S.B., Error Correcting Codes for Digital Communication an Storages, Pretice Hall, 1998.
- [25] Oppenstein, Michael 2008. Code Hamming (7,4) Discussion and Implementation. Prentice hall : New York
- [26] Porakis, John. G, Salehi Masoud, Digital Communication Fifth Edition, Mc Graw-Hill Higher Education. 2008
- [27] K. Deergha Rao. "Channel Coding Technique for Wireless Communications". Springer. 2001

## LAMPIRAN A

a. Kapasitas untuk *Threshold* 0.3 dan 0.5

BPSK	QPSK	16-QAM	TOTAL
45918	96934	22460	165312
47501	88266	33464	169231
54979	84374	11336	150689
48156	97816	11744	157716
55398	79428	19552	154378
56668	81904	9520	148092
41807	101890	28892	172578
50584	94172	9320	154076
49276	92716	17464	159456
61197	75168	4876	141241
<b>Rata-rata</b>			
<b>51148,4</b>	<b>89266,8</b>	<b>16862,8</b>	<b>157278</b>

$$f_d = 0.000128$$

BPSK	QPSK	16-QAM	TOTAL
13130	130380	86720	230230
16763	117602	97744	232109
17360	135914	58732	212006
10065	146744	66252	223061
22029	120850	70184	213063
18376	136916	52664	207956
10328	129232	100224	239784
10920	149134	58052	218106
13389	135872	135872	285133
18668	128788	67752	215208
<b>Rata-rata</b>			
<b>15102,8</b>	<b>133143,2</b>	<b>79419,6</b>	<b>227665,6</b>

$$f_d = 0.00128$$

BPSK	QPSK	16-QAM	TOTAL
94385	11018	424	105827
91634	15876	1712	109222
97166	5612	112	102890
97064	5822	100	102986
95112	9502	548	105162
97620	4722	76	102418
92752	14132	728	107612
97670	4644	32	102346
95634	8580	8580	112794
95633	8536	396	104565
<b>Rata-rata</b>			
<b>95467</b>	<b>8844,4</b>	<b>1270,8</b>	<b>105582,2</b>

$$f_d = 0.0128$$

b. Kapasitas untuk *Threshold* 0.2 dan 0.4

<b>BPSK</b>	<b>QPSK</b>	<b>16-QAM</b>	<b>TOTAL</b>
58902	74742	14908	148552
85700	28112	976	114788
48477	87858	30496	166831
50289	91222	16640	158151
76262	44774	5392	126428
72660	53866	1628	128154
85514	26726	4472	116712
63329	62216	22652	148197
51868	86562	19404	157834
63792	66836	11160	141788
<b>Rata-rata</b>			
<b>65679,3</b>	<b>62291,4</b>	<b>12772,8</b>	<b>140743,5</b>

$$f_d = 0.000128$$

<b>BPSK</b>	<b>QPSK</b>	<b>16-QAM</b>	<b>TOTAL</b>
24253	1211488	60012	205753
45609	104110	9344	159063
17366	118586	93364	229316
14987	133538	72976	221501
43972	98454	27204	169630
25114	140586	18372	184072
64887	60966	18520	144373
34585	98346	64968	197899
17550	127460	127460	272470
28930	117520	49420	195690
<b>Rata-rata</b>			
<b>31725,3</b>	<b>112105,4</b>	<b>54146</b>	<b>197976,7</b>

$$f_d = 0.00128$$

<b>BPSK</b>	<b>QPSK</b>	<b>16-QAM</b>	<b>TOTAL</b>
96273	7324	260	103857
99756	486	4	100246
92376	14558	1380	108314
95840	8224	192	104256
98652	2668	56	101376
99593	812	4	100409
98882	2166	140	101188
94337	10696	1260	106293
95149	9508	9508	114165
97210	5490	180	102880
<b>Rata-rata</b>			
<b>96806,8</b>	<b>6193,2</b>	<b>1298,4</b>	<b>104298,4</b>

$$f_d = 0.0128$$

c. Kpasitas untuk *Threshold* 0.5 dan 0.7

<b>BPSK</b>	<b>QPSK</b>	<b>16-QAM</b>	<b>TOTAL</b>
95951	7982	232	104165
84726	30022	1052	115800
97777	4436	20	102233
76755	46038	904	123697
84455	28444	5292	118191
81618	33742	6044	121404
94798	10128	552	105478
82568	32366	4996	119930
95879	8138	208	104225
97152	5614	164	102930
<b>Rata-rata</b>			
<b>89167,9</b>	<b>20691</b>	<b>1946,4</b>	<b>111805,3</b>

$$f_d = 0.000128$$

<b>BPSK</b>	<b>QPSK</b>	<b>16-QAM</b>	<b>TOTAL</b>
81491	35750	2536	119777
44452	106040	10112	160604
77406	44934	508	122848
85145	28872	1676	115693
28159	137518	12328	178005
63532	62586	20700	146818
34855	98378	63824	197057
80790	36438	3964	121192
57885	73256	735256	204397
77688	43554	2140	123382
<b>Rata-rata</b>			
<b>63140,3</b>	<b>66732,6</b>	<b>19104,4</b>	<b>148977,3</b>

$$f_d = 0.00128$$

<b>BPSK</b>	<b>QPSK</b>	<b>16-QAM</b>	<b>TOTAL</b>
99942	116	0	100058
99737	526	0	100263
99995	10	0	100005
99959	82	0	100041
99774	452	0	100226
98677	2572	148	101397
94485	10354	1352	106191
99862	272	8	100142
98751	2446	2446	103643
99948	104	0	100052
<b>Rata-rata</b>			
<b>99113</b>	<b>1693,4</b>	<b>395,4</b>	<b>101201,8</b>

$$f_d = 0.0128$$

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## LAMPIRAN B

### LISTING PROGRAM

#### -IMPLEMENTASI MODULASI ADAPTIF DENGAN *CHANNEL CODING*-

```
clear all
close all

%Parameter Multipath
M=6; %number multipath berdasarkan ITU environment
N=1000; %number of sample to generate
Nsc=8; %number of subcarrier
Nifft=16; %number of IFFT
fd=0.0128; %frequency doppler
T=1; %time periode satu simbol
Fs=1/T; %Frekuensi sampling

%Pemodelan Kanal Frekuensi Selektif --> Multicarrier Channel
System
a=0;
b=2*pi;
delay=rand(M);
theta=a+(b-a)*rand(1,M);
ri=randn(M,N);
rq=randn(M,N);
ap=sqrt((ri.^2+rq.^2));
for n=1:N;
    for sc=0:Nsc-1
        for m=1:M;
            H(m,sc+1)=(ap(m,n)*exp(j*b*(fd*n-sc*Fs*delay(m))+theta(m)));
        end
        HH=ones(1,M)*H/M;
        HF(:,n)=HH.';
    end
    HF=HF/max(max(HF));
    aHF=(abs(HF));
    aaa=reshape(aHF,Nsc,[]);
    yy=aaa(Nifft/2,:);

    %%%-----MODULASI ADAPTIF DENGAN CHANNEL CODING-----%%%
    yy=zeros(size(aHF));
    MM=length(aHF(1,:));
    KK=length(aHF(:,1));
    %Penentuan Threshold Adaptif
    for m=1:MM;
        for k=1:KK;
            if aaa(k,m)<=0.3
                yy(k,m)=1;
            elseif aaa(k,m)<=0.5
                yy(k,m)=2;
            else
                yy(k,m)=4;
            end
        end
    end
end
end
```

```

%Implementasi Channel Coding
jdata=sum(sum(yy));
jblok=(floor(jdata/7));
zp=jdata-(jblok*7);
jbit=jblok*4;
data=randint(1,jbit,[0 1]);
kode=encode(data,7,4);
kodedata=[kode zeros(1,zp)];
batas=sum(yy);
bb=ones(1,MM);
for m=2:MM;
bb(1,m)=batas(1,m-1)+bb(1,m-1);
end
ba=[bb(1,2:length(bb))-1 jdata];
bb2=ones(8,MM);
bb2(1,:)=bb;
for m=1:MM;
    for k=2:8;
        bb2(k,m)=bb2(k-1,m)+yy(k-1,m);
    end
end
ba2=[];
ba2=[bb2(2:8,:)-1; ba(1,1:length(ba))];
sp2=ones(8,N);
%Pemilihan Modulasi Adaptif BPSK=1 bit/QPSK=2bit/16-QAM=4bit
for m=1:MM
    for kk=1:8
        if yy(kk,m)==1
            modbpsk=2*kodedata(1,bb2(kk,m):ba2(kk,m))-1;
            sps=modbpsk;
        elseif yy(kk,m)==2;
            modqpsk=2*kodedata(1,bb2(kk,m):ba2(kk,m))-1;
            x=reshape(modqpsk,2,[]);
            xI=x(1,:);
            xQ=x(2,:);xQ=1i*xQ;
            qpsk=(xI+xQ)*(1/sqrt(2));
            sps=qpsk;
        else
            modqam=reshape(kodedata(1,bb2(kk,m):ba2(kk,m)),4,[]);
            xI1=2*modqam(1,:)-1;
            xI2=2-(2*modqam(2,:)-1);
            xQ1=2*modqam(3,:)-1;
            xQ2=2-(2*modqam(4,:)-1);
            xI=xI1.*xI2;xQ=xQ1.*xQ2;
            qam=(1/sqrt(10))*(xI+j*xQ);
            sps=qam;
        end
        sp2(kk,m)=sps;
    end
end
HFsp2=sp2.*aHF;
Ey=mean(mean(abs(HFsp2).^2));
EydB=10*log10(Ey);
%Proses Sistem OFDM
ofdmTx=ifft(HFsp2,Nfft);
ofdmRx=reshape(ofdmTx,1,[]);
SNR=EydB:2:50;
for mm=1:length(SNR)

```

```

ofdmRxn=awgn(ofdmRx,SNR(mm),-EydB-10*log10(Nifft),11);
ofdmRxn=reshape(ofdmRxn,Nifft,[]);
ofdm_rx=fft(ofdmRxn,Nifft);
ofdm_r=ofdm_rx(1:Nsc,:);
dataE=[];
for m=1:MM
    for ii=1:8
        if yy(ii,m)==1
            demod=sign(real(ofdm_r(ii,m)));
        else if yy(ii,m)==2
            ofdm_r(ii,m)=ofdm_r(ii,m)/aHF(ii,m);
            dR=sign(real(ofdm_r(ii,m)));
            dI=sign(imag(ofdm_r(ii,m)));
            modqpsk=[dR';dI'];
            demod=reshape(modqpsk,1,[]);
        else
            ofdm_r(ii,m)=ofdm_r(ii,m)/aHF(ii,m);
            b1=sign(real(ofdm_r(ii,m)));
            b2=-sign(sqrt(10)*abs(real(ofdm_r(ii,m)))-2);
            b3=sign(imag(ofdm_r(ii,m)));
            b4=-sign(sqrt(10)*abs(imag(ofdm_r(ii,m)))-2);
            modqam=[b1';b2';b3';b4'];
            demod=reshape(modqam,1,[]);
        end
    end
    dataE(1,bb2(ii,m):ba2(ii,m))=demod;
end
end

dataE=floor((dataE+1)/2);
dataE0=dataE(1:length(kode));
decodedata=decode(dataE0,7,4);
[num,ber]=biterr(data,decodedata);
BER_ADAPTIF_coding(1,mm)=ber;
end
SNRl=10.^(SNR/10);

%%%-----MODULASI ADAPTIF TANPA CHANNEL CODING-----%%%

a_uc=0;
b_uc=2*pi;
delay_uc=rand(M);
theta_uc=a_uc+(b_uc-a_uc)*rand(1,M);
ri_uc=randn(M,N);
rq_uc=randn(M,N);
ap_uc=sqrt((ri_uc.^2+rq_uc.^2));
for n=1:N;
    for sc=0:Nsc-1
        for m=1:M;
            H(m,sc+1)=(ap_uc(m,n)*exp(j*b_uc*(fd*n-sc*Fs*delay_uc(m))+theta_uc(m)));
        end
        HH=ones(1,M)*H/M;
    end
    HF_uc(:,n)=HH.';
end

```

```

HF_uc=HF_uc/max(max(HF_uc));
aHF_uc=(abs(HF_uc));
aaa_uc=reshape(aHF_uc,Nsc,[]);
yy_uc=aaa_uc(Nifft/2,:);
yy_uc=zeros(size(aHF_uc));
MM_uc=length(aHF_uc(1,:));
KK_uc=length(aHF_uc(:,1));
for m=1:MM_uc;
for k=1:KK_uc;
    if aaa_uc(k,m)<=0.5
        yy_uc(k,m)=1;
    elseif aaa_uc(k,m)<=0.7
        yy_uc(k,m)=2;
    else
        yy_uc(k,m)=4;
    end
end
end
jdata_uc=sum(sum(yy_uc));
data_uc=randint(1,jdata_uc,[0 1]);
batas_uc=sum(yy_uc);
bb_uc=ones(1,MM_uc);
for m=2:MM_uc;
bb_uc(1,m)=batas_uc(1,m-1)+bb_uc(1,m-1);
end
ba_uc=[bb_uc(1,2:length(bb_uc))-1 jdata_uc];
bb2_uc=ones(8,MM_uc);
bb2_uc(1,:)=bb_uc;
for m=1:MM_uc;
    for k=2:8;
        bb2_uc(k,m)=bb2_uc(k-1,m)+yy_uc(k-1,m);
    end
end
ba2_uc=[];
ba2_uc=[bb2_uc(2:8,:)-1; ba_uc(1,1:length(ba_uc))];
sp2_uc=ones(8,N);

for m=1:MM_uc
    for kk=1:8
        if yy_uc(kk,m)==1
            modbpsk=2*data_uc(1,bb2_uc(kk,m):ba2_uc(kk,m))-1;
            sps=modbpsk;
        elseif yy_uc(kk,m)==2;
            modqpsk=2*data_uc(1,bb2_uc(kk,m):ba2_uc(kk,m))-1;
            x=reshape(modqpsk,2,[]);
            xI=x(1,:);
            xQ=x(2,:);xQ=1i*xQ;
            qpsk=(xI+xQ)*(1/sqrt(2));
            sps=qpsk;
        else
            modqam=reshape(data_uc(1,bb2_uc(kk,m):ba2_uc(kk,m)),4,[]);
            xI1=2*modqam(1,:)-1;
            xI2=2-(2*modqam(2,:)-1);
            xQ1=2*modqam(3,:)-1;
            xQ2=2-(2*modqam(4,:)-1);
            xI=xI1.*xI2;xQ=xQ1.*xQ2;
            qam=(1/sqrt(10))*(xI+j*xQ);

```

```

        sps=qam;
    end
    sp2_uc(kk,m)=sps;
end
end
HFsp2_uc=sp2_uc.*aHF_uc;
Ey_uc=mean(mean(abs(HFsp2_uc).^2));
EydB_uc=10*log10(Ey_uc);
ofdmTx_uc=ifft(HFsp2_uc,Nifft);
ofdms_uc=reshape(ofdmTx_uc,1,[]);
ofdmRx_uc=ofdms_uc;
SNR_uc=EydB_uc:2:50;
for mm=1:length(SNR_uc)
    ofdmRxn_uc=awgn(ofdmRx_uc,SNR_uc(mm),-EydB_uc-10*log10(Nifft),11);
    ofdmRxnuc=reshape(ofdmRxn_uc,Nifft,[]);
    ofdm_rx_uc=fft(ofdmRxnuc,Nifft);
    ofdm_r_uc=ofdm_rx_uc(1:Nsc,:);

dataE_uc=[];
for m=1:MM_uc
    for ii=1:8
        if yy_uc(ii,m)==1
            demod=sign(real(ofdm_r_uc(ii,m)));
        else if yy_uc(ii,m)==2
            ofdm_r_uc(ii,m)=ofdm_r_uc(ii,m)/aHF_uc(ii,m);
            dR=sign(real(ofdm_r_uc(ii,m)));
            dI=sign(imag(ofdm_r_uc(ii,m)));
            modqpsk=[dR';dI'];
            demod=reshape(modqpsk,1,[]);
        else
            ofdm_r_uc(ii,m)=ofdm_r_uc(ii,m)/aHF_uc(ii,m);
            b1=sign(real(ofdm_r_uc(ii,m)));
            b2=-sign(sqrt(10)*abs(real(ofdm_r_uc(ii,m)))-2);
            b3=sign(imag(ofdm_r_uc(ii,m)));
            b4=-sign(sqrt(10)*abs(imag(ofdm_r_uc(ii,m)))-2);
            modqam=[b1';b2';b3';b4'];
            demod=reshape(modqam,1,[]);
        end
    end
    dataE_uc(1,bb2_uc(ii,m):ba2_uc(ii,m))=demod;
end
end

dataE_uc=floor((dataE_uc+1)/2);
[num,ber]=biterr(data_uc,dataE_uc);
BER_ADAPTIF_uncod(1,mm)=ber;
end
SNRl_uc=10.^(SNR_uc/10);
%Kinerja BER Modulasi Adaptif dengan dan Tanpa Channel Coding
figure(1)
semilogy(SNR+EydB-10*log10(Nsc),BER_ADAPTIF_coding,'d-
b','linewidth',2,'MarkerSize',5)
hold on
semilogy(SNR_uc+EydB_uc-10*log10(Nsc),BER_ADAPTIF_uncod,'o-
k','linewidth',2,'MarkerSize',5)
xlabel('SNR (dB)');ylabel('BER');

```

```

legend('Adaptive With Channel Coding','Adaptive Without Channel Coding');
axis([0 30 0.00005 1])
grid on

%Respon Gain Kanal
figure(2)
subplot(2,1,1);
plot(aaa(1:50),'-r','Linewidth',1.5);
xlabel('Subcarrier Index')
ylabel('Channel Gain |Hn|')
subplot(2,1,2);
stem(yy_1(1:50),'filled')
xlabel('Subcarrier Index')
ylabel('Bit Allocation')
axis([1 50 0 6])

%Kapasitas Sistem Kanal Rayleigh dan AWGN
figure(3)
c_awgn=log2(1+SNRl);
plot(c_awgn,'b-','linewidth',1)
hold on
c_ray=log2(exp(1))*exp(1./SNRl).*expint(1./SNRl);
plot(c_ray,'r-','linewidth',1)
xlabel('SNR (dB)');
ylabel('Capacity (bps/Hz)');
legend('AWGN channel capacity','Fading channel ergodic capacity');
title('Kapasitas dari Kanal AWGN dan Kanal Rayleigh Fading');
axis([0 30 0 16])

%Scatter Plot
figure(4)
plot(real(ofdm_r),imag(ofdm_r),'b.','linewidth',2,'MarkerSize',5)

title('SCATTER PLOT');
xlabel('In-phase');ylabel('Quadrature');
grid on

```

### **-POWER SPECTRAL DENSITY PADA KANAL AWGN DAN RAYLEIGH-**

```

%Parameter Multipath
M=6; %number multipath berdasarkan ITU environment
N=1000; %number of sample to generate
Nsc=8; %number of subcarrier
Nifft=16; %number of IFFT
fd=0.0128; %frequency doppler
T=1; %time periode satu simbol
Fs=1/T; %Frekuensi sampling

%---KANAL AWGN---%
a=0;
b=2*pi;
delay=rand(M);
theta=a+(b-a)*rand(1,M);
ri=randn(M,N);
rq=randn(M,N);
ap=sqrt((ri.^2+rq.^2));

```

```

for n=1:N;
    for sc=0:Nsc-1
        for m=1:M;
            H(m,sc+1)=(ap(m,n)*exp(j*b*(fd*n-sc*Fs*delay(m))+theta(m)));
        end
        HH=ones(1,M)*H/M;
    end
    HF(:,n)=HH.';
end
HF=HF/max(max(HF));
aHF=(abs(HF));
aaa=reshape(aHF,Nsc,[]);
yy_3=aaa(Nifft/2,:);
yy_3=zeros(size(aHF));
MM_3=length(aHF(1,:));
KK_3=length(aHF(:,1));
for m=1:MM_3;
    for k=1:KK_3;
        if aaa(k,m)<=0.5
            yy_3(k,m)=4;
        elseif aaa(k,m)<=0.7
            yy_3(k,m)=4;
        else
            yy_3(k,m)=4;
        end
    end
end
end
jdata3=sum(sum(yy_3));
data3=randint(1,jdata3,[0 1]);
batas3=sum(yy_3);
bb=ones(1,MM_3);

for m=2:MM_3;
    bb(1,m)=batas3(1,m-1)+bb(1,m-1);
end
ba=[bb(1,2:length(bb))-1 jdata3];
bb2=ones(8,MM_3);
bb2(1,:)=bb;
for m=1:MM_3;
    for k=2:8;
        bb2(k,m)=bb2(k-1,m)+yy_3(k-1,m);
    end
end
ba2=[];
ba2=[bb2(2:8,:)-1; ba(1,1:length(ba))];
sp2=ones(8,N);
%modulasi adaptif BPSK/QPSK/16-QAM
for m=1:MM_3
    for kk=1:8
        if yy_3(kk,m)==1
            modbpsk_3=2*data3(1,bb2(kk,m):ba2(kk,m))-1;
            sps_3=modbpsk_3;
        elseif yy_3(kk,m)==2;
            modqpsk_3=2*data3(1,bb2(kk,m):ba2(kk,m))-1;
            x=reshape(modqpsk_3,2,[]);
            xI=x(1,:);
            xQ=x(2,:);xQ=1i*xQ;
        end
    end
end

```

```

        qpsk_3=(xI+xQ)*(1/sqrt(2));
        sps_3=qpsk_3;
    else
        modqam_3=reshape(data3(1,bb2(kk,m):ba2(kk,m)),4,[]);
        xI1=2*modqam_3(1,:)-1;
        xI2=2-(2*modqam_3(2,:)-1);
        xQ1=2*modqam_3(3,:)-1;
        xQ2=2-(2*modqam_3(4,:)-1);
        xI=xI1.*xI2;xQ=xQ1.*xQ2;
        qam_3=(1/sqrt(10))*(xI+j*xQ);
        sps_3=qam_3;
    end
    sp2(kk,m)=sps_3;
end
end
HFsp2=sp2;
ofdms_3=ifft(HFsp2,Nifft);
ofdmTx_3=reshape(ofdms_3,1,[]);

%---KANAL RAYLEIGH---%
yy_1=aaa(Nifft/2,:);
yy1=yy_1;
yy_1=zeros(size(aHF));
MM_1=length(aHF(1,:));
KK_1=length(aHF(:,1));
for m=1:MM_1;
for k=1:KK_1;
    if aaa(k,m)<=0.5
        yy_1(k,m)=4;
    elseif aaa(k,m)<=0.7
        yy_1(k,m)=4;
    else
        yy_1(k,m)=4;
    end
end
end
jdata1=sum(sum(yy_1));
data1=randint(1,jdata1,[0 1]);
batas1=sum(yy_1);
bb=ones(1,MM_1);
for m=2:MM_1;
bb(1,m)=batas1(1,m-1)+bb(1,m-1);
end
ba=[bb(1,2:length(bb))-1 jdata1];
bb2=ones(8,MM_1);
bb2(1,:)=bb;
for m=1:MM_1;
    for k=2:8;
        bb2(k,m)=bb2(k-1,m)+yy_1(k-1,m);
    end
end
end
ba2=[];
ba2=[bb2(2:8,:)-1; ba(1,1:length(ba))];
sp2=ones(8,N);

for m=1:MM_1
    for kk=1:8

```



```

if yy_1(kk,m)==1
    modbpsk=2*data1(1,bb2(kk,m):ba2(kk,m))-1;
    sps=modbpsk;
elseif yy_1(kk,m)==2;
    modqpsk=2*data1(1,bb2(kk,m):ba2(kk,m))-1;
    x=reshape(modqpsk,2,[]);
    xI=x(1,:);
    xQ=x(2,:);xQ=1i*xQ;
    qpsk=(xI+xQ)*(1/sqrt(2));
    sps=qpsk;
else
    modqam=reshape(data1(1,bb2(kk,m):ba2(kk,m)),4,[]);
    xI1=2*modqam(1,:)-1;
    xI2=2-(2*modqam(2,:)-1);
    xQ1=2*modqam(3,:)-1;
    xQ2=2-(2*modqam(4,:)-1);
    xI=xI1.*xI2;xQ=xQ1.*xQ2;
    qam=(1/sqrt(10))*(xI+j*xQ);
    sps=qam;
end
sp2(kk,m)=sps;
end
end
HFsp2_=sp2.*aHF;
Ey=mean(mean(abs(HFsp2_).^2));
EydB=10*log10(Ey);
ofdmTx=ifft(HFsp2,Nifft);
ofdms=reshape(ofdmTx,1,[]);
%---PLOT POWER SPECTRAL DENSITY---%
Fs=512;
[Pxx,F]=pwelch(ofdmTx_3,[],[],[],Fs,'centered');
[Pyx,F]=pwelch(ofdms,[],[],[],Fs,'centered');
spasi=length(Pxx)/(2*Fs);
spi=7*spasi;
Pxx1=[Pxx(spi+1:length(Pxx));Pxx(1:spi)];
Pyx1=[Pyx(spi+1:length(Pxx));Pyx(1:spi)];
gain=max(Pyx1)/max(Pxx1);
figure(1)
F1=F-7.5;
plot(F1,10*log10(Pxx),'m',F1,10*log10(Pyx)-10*log10(gain),'g')
grid on
legend('PSD Without Doppler Effect','PSD With Doppler Effect')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Power Spectral Density');
%---SCATTER PLOT---%
figure(2)
plot(real(HFsp2_),imag(HFsp2_), 'r.', 'linewidth',3, 'MarkerSize',8)
title('SCATTER PLOT');
xlabel('In-phase');ylabel('Quadrature');
grid on
%---DISTRIBUTION PDF---%
figure(3)
histfit(real(HFsp2),100,'normal')
xlabel('Random Variable, x')
ylabel('f(x)')
title('Probability Density Function of Gaussian Distribution')
figure(4)
histfit(abs(ofdmS),150)

```

```

xlabel('Random Variable,r')
ylabel('P(r)')
title('Probability Density Function of Rayleigh Distribution')

```

### -KURVA CCDF PADA VARIASI FREKUENSI DOPPLER-

```

%%%---CCDF Doppler Pertama---%%%
M=6; %number multipath berdasarkan ITU environment
N=10000; %number of sample to generate
Nsc=8; %number of subcarrier
Nifft=16; %number of IFFT
fd=0.0128; %frequency Doppler
T=1; %time periode satu simbol
Fs=1/T; %Frekuensi sampling

%Multicarrier channel coding
a=0;
b=2*pi;
delay=rand(M);
theta=a+(b-a)*rand(1,M);
ri=randn(M,N);
rq=randn(M,N);
ap=sqrt((ri.^2+rq.^2));
for n=1:N;
    for sc=0:Nsc-1
        for m=1:M;
            H(m,sc+1)=(ap(m,n)*exp(j*b*(fd*n-sc*Fs*delay(m))+theta(m)));
        end
        HH=ones(1,M)*H/M;
    end
    HF(:,n)=HH.';
end
HF=HF/max(max(HF));
aHF=(abs(HF));
aaa=reshape(aHF,Nsc,[]);
yy1=aaa(Nifft/2,:);

%%%---CCDF Doppler Kedua---%%%
M2=6; %number multipath berdasarkan ITU environment
N2=100000; %number of sample to generate
Nsc2=8; %number of subcarrier
Nifft2=16; %number of IFFT
fd2=0.00128; %frequency Doppler
T2=1; %time periode satu simbol
Fs2=1/T2; %Frekuensi sampling

%Multicarrier channel coding
a2=0;
b2=2*pi;
delay2=rand(M2);
theta2=a2+(b2-a2)*rand(1,M2);
ri2=randn(M2,N2);
rq2=randn(M2,N2);
ap2=sqrt((ri2.^2+rq2.^2));
for n=1:N2;
    for sc=0:Nsc2-1
        for m=1:M2;

```

```

        H(m,sc+1)=(ap2(m,n)*exp(j*b2*(fd2*n-
sc*Fs2*delay2(m))+theta2(m)));
    end
    HH=ones(1,M2)*H/M2;
    end
    HF2(:,n)=HH.';
end
HF2=HF2/max(max(HF2));
aHF2=(abs(HF2));
aaa2=reshape(aHF2,Nsc2,[]);
yy12=aaa2(Nifft2/2,:);
yy2=yy12;

%%%---CCDF Doppler Ketiga---%%%
M3=6; %number multipath berdasarkan ITU environment
N3=100000; %number of sample to generate
Nsc3=8; %number of subcarrier
Nifft3=16; %number of IFFT
fd3=0.000128; %frequency Doppler
T3=1; %time periode satu simbol
Fs2=1/T3; %Frekuensi sampling

%Multicarrier channel coding
a3=0;
b3=2*pi;
delay3=rand(M3);
theta3=a3+(b3-a3)*rand(1,M3);
ri3=randn(M3,N3);
rq3=randn(M3,N3);
ap3=sqrt((ri3.^2+rq3.^2));
for n=1:N3;
    for sc=0:Nsc3-1
        for m=1:M3;
            H(m,sc+1)=(ap3(m,n)*exp(j*b3*(fd3*n-
sc*Fs2*delay3(m))+theta3(m)));
        end
        HH=ones(1,M3)*H/M3;
        end
        HF3(:,n)=HH.';
    end
    HF3=HF3/max(max(HF3));
    aHF3=(abs(HF3));
    aaa3=reshape(aHF3,Nsc3,[]);
    yy3=aaa3(Nifft3/2,:);
    yy13=yy3;
    figure(1)
    [cy,cx]=ccdf(abs(yy1),0.01);
    plot(cx,cy,'b-','linewidth',2.5)
    hold on
    [cy,cx]=ccdf(abs(yy2),0.01);
    plot(cx,cy,'r-','linewidth',2.5)
    hold on
    [cy,cx]=ccdf(abs(yy13),0.01);
    plot(cx,cy,'g-','linewidth',2.5)
    title(' Channel Capacity of Multicarrier Channel Modeling');
    xlabel('Channel Gain')
    ylabel('Probability (Channel Gain > Abcissa)')
    legend('Doppler 0.0128','Doppler 0.00128','Doppler 0.000128')

```

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BIODATA PENULIS



Penulis telah menyelesaikan pendidikan jenjang S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS) pada jurusan Teknik Elektro bidang studi Telekomunikasi Multimedia, lulus pada bulan September tahun 2016 dan terdaftar sebagai mahasiswa Program Pasca Sarjana bulan September tahun 2016 pada bidang studi Telekomunikasi Multimedia di Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).

Penulis telah mengikuti Seminar Tesis dengan judul “**Implementasi *Channel Coding* untuk Mitigasi Efek Doppler pada OFDM dengan Modulasi Adaptif untuk VANET**” pada tanggal 8 Juni 2017 sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik (M.T).

Nama : Rizkha Ajeng Rochmatika

Tempat, Tgl Lahir : Pati, 31 Juli 1994

Email : rizkha.ajeng@gmail.com

Riwayat Pendidikan :

SDN Pati Lor 02 (2000-2006)

SMPN 3 Pati (2006-2009)

SMAN 1 Pati (2009-2012)

S1 Teknik Elektro ITS (2012-2016)

S2 Teknik Elektro ITS (2016-2018)